

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Comparación de dos programas CAD mediante el diseño y  
simulación de un sistema de transmisión**



**Memoria i Anejos**

**Autor:** Salvador Rodríguez Martín  
**Director:** Oscar Farrerons Vidal  
**Convocatoria:** Octubre 2018



## Resum

El present document recull els conceptes teòrics, els procediments seguits i els resultats obtinguts en la realització del treball sobre la comparació de dos programes CAD: SolidWorks i CATIA V5. Per a això, s'ha modelat i simulat el canvi de marxes de la motocicleta Suzuki GSRX K7, en ambdós programes. Cal destacar que aquesta simulació s'ha obtingut a partir d'inputs d'un cas de funcionament real del canvi de marxes. Tots dos programes disposen de diferents eines per modelar, en aquest estudi ens enfoquem únicament en el modelatge mitjançant: taules de disseny i disseny condicionat per un entorn prèviament definit. Pel que fa a la simulació, ens centrem en els mòduls d'anàlisi de moviment de tots dos programes. Els punts més importants a destacar són: el mètode de treball en la simulació, definició de restriccions cinemàtiques, execució de la simulació i adquisició de resultats. Posteriorment a l'adquisició de resultats, s'ha realitzat una comparativa dels punts comentats anteriorment en el disseny i simulació dels dos programes CAD utilitzats. Finalment, s'han obtingut conclusions sobre aquesta comparativa.

## Resumen

El presente documento recoge los conceptos teóricos, los procedimientos seguidos y los resultados obtenidos en la realización del trabajo sobre la comparación de dos programas CAD: SolidWorks y CATIA V5. Para ello, se ha modelado y simulado el cambio de marchas de la motocicleta Suzuki GSRX K7, en ambos programas. Cabe destacar que dicha simulación se ha obtenido a partir de inputs de un caso de funcionamiento real del cambio de marchas. Ambos programas disponen de diferentes herramientas para modelar, en este estudio nos enfocamos únicamente en el modelaje mediante: tablas de diseño y diseño condicionado por un entorno previamente definido. Respecto a la simulación, nos centramos en los módulos de análisis de movimiento de ambos programas. Los puntos más importantes que destacar son: el método de trabajo en la simulación, definición de restricciones cinemáticas, ejecución de la simulación y adquisición de resultados. Posteriormente a la adquisición de resultados, se ha realizado una comparativa de los puntos comentados anteriormente en el diseño y simulación de los dos programas CAD utilizados. Finalmente, se han obtenido conclusiones sobre dicha comparativa.



## **Abstract**

The content of this document is about the theoretical concepts, the following procedures and the results based on the comparison between two CAD programs: SolidWorks and CATIA V5. The gearshift of the Suzuki GSRX K7 it's been modelled and simulated on these programs and it should be pointed out that this simulation is about the inputs obtaining in a real case of gearshift operation. Both programs have different modelling tools, this study is focused only on modelling by design tables and by a previously defined environment. In relation to the simulation, we centre on the movement analysis modules of the two programs. The standing out points are the work method at the simulation, the cinematic restriction definition, the simulation execution and the result obtaining. After getting the result a comparison was made about the different points discussed previously mentioned on the design and simulation of the two CAD programs. Lastly, conclusions have been drawn about this comparative.



## Agradecimientos

Ha sido un periodo de aprendizaje intenso, escribir este trabajo ha tenido un gran impacto en mí, tanto a nivel académico cómo personal, y me gustaría poder agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado durante este proceso.

Tengo que expresar mis agradecimientos a las personas que me han ayudado a formarme a lo largo de mi carrera académica.

A mi tutor Oscar Farrerons que me ha brindado la oportunidad de poder hacer este Trabajo de Final de Grado en la Universitat Politècnica de Catalunya.

A mi familia y amigos solo puedo expresar mi sincero agradecimiento por apoyarme durante toda esta etapa académica.





## Glosario

<b>Angle driven</b>	Motor de ángulo
<b>Applications</b>	Aplicaciones. Elemento de un Product
<b>Assembly Design</b>	Módulo ensamblaje de CATIA V5
<b>Body</b>	Cuerpo no principal de la pieza
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design: diseño asistido por ordenador
<b>CATIA</b>	Computer-Aided three dimensional interactive application
<b>CGR</b>	CATIA Graphical Rrepresentation: archivo de visualización CAD
<b>Commands</b>	Comandos o motores
<b>Constraint</b>	Constricción
<b>CSV</b>	Comma-Separated Values: archivo Excel separado por comas
<b>Curve Point Joint</b>	Restricción cinemática entre un punto y una curva
<b>db</b>	Diámetro base
<b>de</b>	Diámetro exterior
<b>di</b>	Diámetro interior
<b>DMU Kinematics</b>	Módulo cinemático de CATIA V5
<b>dp</b>	Diámetro primitivo
<b>Elements</b>	Elementos
<b>Extract</b>	Extraer. Herramienta utilizada para la extracción de una sola geometría
<b>FeatureManager</b>	Árbol de diseño de SolidWorks
<b>Gear joints</b>	Juntas de engranaje. Restricción cinemática de DMU Kinematics

<b>Fix part</b>	Parte fija. Restricción cinemática de DMU Kinematics
<b>Geometrical set</b>	Conjunto geométrico
<b>GSD</b>	Generative Shape Design
<b>Hip</b>	Hipótesis
<b>h</b>	Hora
<b>i</b>	Modulo
<b>Input</b>	Entrada
<b>Joints</b>	Juntas
<b>km</b>	Kilómetro
<b>kW</b>	Kilowatt. Unidad de medida de energía
<b>Knowhow</b>	Conocimiento de desarrollo
<b>Laws</b>	Leyes. Formato para la definición de motores en DMU Kinematics
<b>Lenght</b>	Longitud. Tipo de variable en CATIA V5
<b>Lenght driven</b>	Motor de desplazamiento
<b>m</b>	Módulo del diente
<b>mm</b>	Milímetro: unidad de longitud
<b>MotionManager</b>	Árbol de análisis de movimiento
<b>Multiple extract</b>	Extracción múltiple. Herramienta utilizada para la extracción múltiple de geometrías en CATIA V5.
<b>N</b>	Newton: unidad de fuerza
<b>Output</b>	Salida
<b>Pc</b>	Paso de diente

<b>Parallel curve</b>	Curva paralela. Herramienta para creación de curvas paralelas
<b>Part</b>	Parte. Archivo de una pieza para CATIA V5 y SolidWorks
<b>Partbody</b>	Cuerpo principal de la pieza
<b>Part design</b>	Módulo de diseño de sólidos
<b>pc</b>	Pase de diente
<b>Prismatic joint</b>	Junta prismática. Restricción cinemática de CATIA V5
<b>Product</b>	Producto. Archivo de ensamblaje CATIA V5
<b>Profile</b>	Perfil. Herramienta de diseño de CATIA V5
<b>Replay</b>	Reproducir
<b>Revolute joint</b>	Junta de revolución. Restricción cinemática de DMU Kinematics
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>s</b>	Segundos: unidad de tiempo
<b>SelectionManager</b>	Gestor de selección. Herramienta de SolidWorks
<b>Sketch</b>	Croquis
<b>SolidWorks Motion</b>	Módulo de simulación cinemática y dinámica de SolidWorks
<b>Speeds-Accelerations</b>	Velocidades-aceleraciones. Subapartado del árbol de simulación de DMU Kinematics
<b>Spline</b>	Curva guiada por puntos
<b>Spline Akima</b>	Creación de una <i>spline</i> mediante el tipo de interpolación Akima
<b>Split</b>	Corte. Herramienta de corte de superficies y sólidos en CATIA V5
<b>Start</b>	Empezar. Menú de módulos de CATIA V5
<b>Sweep</b>	Barrer. Herramienta de creación de superficies y volúmenes de CATIA V5

**TXT** Archivo de texto

**z** Número de dientes



# Índice

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
1.1. Objetivos del proyecto.....	16
1.2. Alcance del trabajo .....	16
<b>2. CAMBIO DE MARCHAS</b>	<b>17</b>
2.1. Elementos del cambio de marchas.....	17
2.2. Diseño de los elementos del sistema de transmisión .....	19
2.2.1. Diseño de los engranajes e inputs para su modelación con programas CAD .....	19
2.2.2. Diseño del tambor e inputs para su modelación .....	20
2.3. Definición del movimiento de los componentes del conjunto para la simulación .....	20
2.4. Inputs para ejecutar la simulación.....	21
<b>3. DISEÑO CAMBIO DE MARCHAS</b>	<b>24</b>
3.1. Introducción a los módulos de diseño.....	24
3.2. Diseño con CATIA V5.....	24
3.2.1. Modelaje a partir de tablas de diseño y ecuaciones.....	24
3.2.2. Diseño a partir de un entorno previamente definido.....	28
3.3. Diseño con SolidWorks .....	34
3.3.1. Modelaje a partir de tablas de diseño y ecuaciones.....	34
3.3.2. Diseño a partir de un entorno previamente definido.....	37
<b>4. SIMULACIÓN CAMBIO DE MARCHAS</b>	<b>42</b>
4.1. Introducción a los módulos de simulación .....	42
4.1.1. DMU Kinematics.....	42
4.1.2. SolidWorks Motion.....	45
4.2. Simulación con CATIA V5 .....	49
4.2.1. Definición de mecanismo .....	49

4.2.2.	Ejecución de la simulación .....	66
4.2.3.	Resultados .....	66
4.3.	Simulación con SolidWorks .....	72
4.3.1.	Definición de relaciones de posición .....	72
4.3.2.	Definición de comandos .....	77
4.3.3.	Ejecución simulación.....	86
4.3.4.	Resultados .....	88
4.3.5.	Simulación con reajustes: .....	97
4.3.6.	Resultados con reajustes: .....	98
<b>5.</b>	<b>COMPARATIVA GLOBAL DE SOLIDWORKS Y CATIA V5 .....</b>	<b>103</b>
5.1.	Diseño .....	103
5.1.1.	Creación de variables y tablas de diseño.....	103
5.1.2.	Definición de ecuaciones .....	103
5.1.3.	Diseño a partir de un entorno previamente definido .....	103
5.2.	Simulación.....	104
5.2.1.	Método de trabajo.....	104
5.2.2.	Definición de relaciones de posición/mecanismo.....	104
5.2.3.	Creación de comandos .....	104
5.2.4.	Definición de comandos .....	105
5.2.5.	Ejecución de la simulación .....	105
5.2.6.	Extracción de resultados.....	106
5.3.	Económica.....	106
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL .....</b>	<b>108</b>
<b>8.</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>109</b>
8.1.	Costes de personal.....	109
8.2.	Costes de hardware .....	109
8.3.	Costes de software .....	110
8.4.	Otros costes .....	110
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEJO A .....</b>	<b>113</b>
A1.	Resultados velocidad angular CATIA V5.....	113
A2.	Tablas de diseño .....	114

A3.	Inputs para la simulación cinemática en CATIA V5 .....	119
A4.	Inputs para el diseño del sistema de transmisión .....	121
A5.	Resultados simulación SolidWorks Motion .....	123



## 1. Introducción

El Trabajo de Fin de Grado representa la prueba definitiva que; analiza, examina y demuestra los conocimientos y competencias adquiridos por el alumno a lo largo de los cuatro años de la titulación del Grado en Ingeniería en Mecánica, mediante la realización y ejecución de un trabajo individual.

En los últimos años, la evolución de las herramientas para el diseño asistido por ordenador (CAD), en la rama de Ingeniería mecánica, no solo tiende al modelaje de geometrías, sino que integra nuevas herramientas. De este modo, son muchas las herramientas CAD que incorporan porciones de otras y que multiplican por tanto sus aplicaciones, por ejemplo, programas como CATIA V5, este posee módulos CAD, CAE y CAM. Otros ejemplos serían programas como SolidWorks, Siemens NX y Autodesk Inventor. De esta manera, no solo queremos mostrar el potencial de los programas CAD, sino adicionalmente la comparación de estos.

Entre todos los programas CAD existentes se destaca el uso de SolidWorks y CATIA V5 en empresas, para la formación académica o a nivel de usuario. Estos dos programas han sido los que se han seleccionado para realizar este trabajo.

SolidWorks software para el modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. (una filial de Dassault Systèmes, S.A), para el sistema operativo Microsoft Windows. La empresa SolidWorks Corp. fue fundada en 1993 por Stephen Hawking, se lanzó el primer producto, denominado SolidWorks 95, ya que fue este año cuando fue lanzada la primera versión. Este programa está enfocado para proporcionar herramientas de aprendizaje innovadoras para el diseño y el desarrollo de productos que son fáciles de enseñar y de aprender, y cuyo uso resulta interesante. Ofrece software, formación y recursos de comarketing sin coste alguno para ayudarle a tener éxito y ofrece una amplia gama de productos para satisfacer las necesidades de las empresas con diferentes disciplinas, equipos y procesos.

CATIA V5 fue desarrollada inicialmente en 1997 por la empresa de aviones Avions Marcel Dassault. Actualmente pertenece a la empresa Dassault Systèmes. En el mundo del diseño e ingeniería, lidera el uso de diseño, simulación y análisis de producto en un amplio rango de industrias.

## 1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es la comparación de dos programas CAD con un mismo objetivo de diseño. No obstante, este proyecto engloba más objetivos expuestos a continuación:

- Comprender los principios básicos del diseño asistido por ordenador.
- Conocer las competencias básicas de diseño en ambos programas.
- Conocer las competencias básicas y avanzadas para el análisis de movimiento en ambos programas.
- Estudiar el proceso de trabajo en diferentes programas CAD.
- Ilustrar y enseñar a un usuario con conocimientos básicos en CATIA y SolidWorks, el modelaje y posteriormente la simulación cinemática y dinámica de un conjunto.
- Realizar estudio cinemático y dinámico en SolidWorks para poder observar los inconvenientes y ventajas de cada una de ellas.
- Formular hipótesis de estudio para la simulación cinemática y dinámica en SolidWorks.
- Mostrar cómo se comportan los diferentes programas CAD tanto en el diseño como en la simulación.
- Aportar datos económicos de ambos programas.
- Concluir cuál es el programa más adecuado, según los puntos a estudiar en el diseño y simulación.

## 1.2. Alcance del trabajo

Como se ha mencionado en la introducción, aunque los programas CAD dispongan de muchos módulos y/o complementos, en este trabajo nos enfocaremos principalmente en el módulo de diseño en 3D y módulo de análisis de movimiento.

## 2. Cambio de marchas

### 2.1. Elementos del cambio de marchas

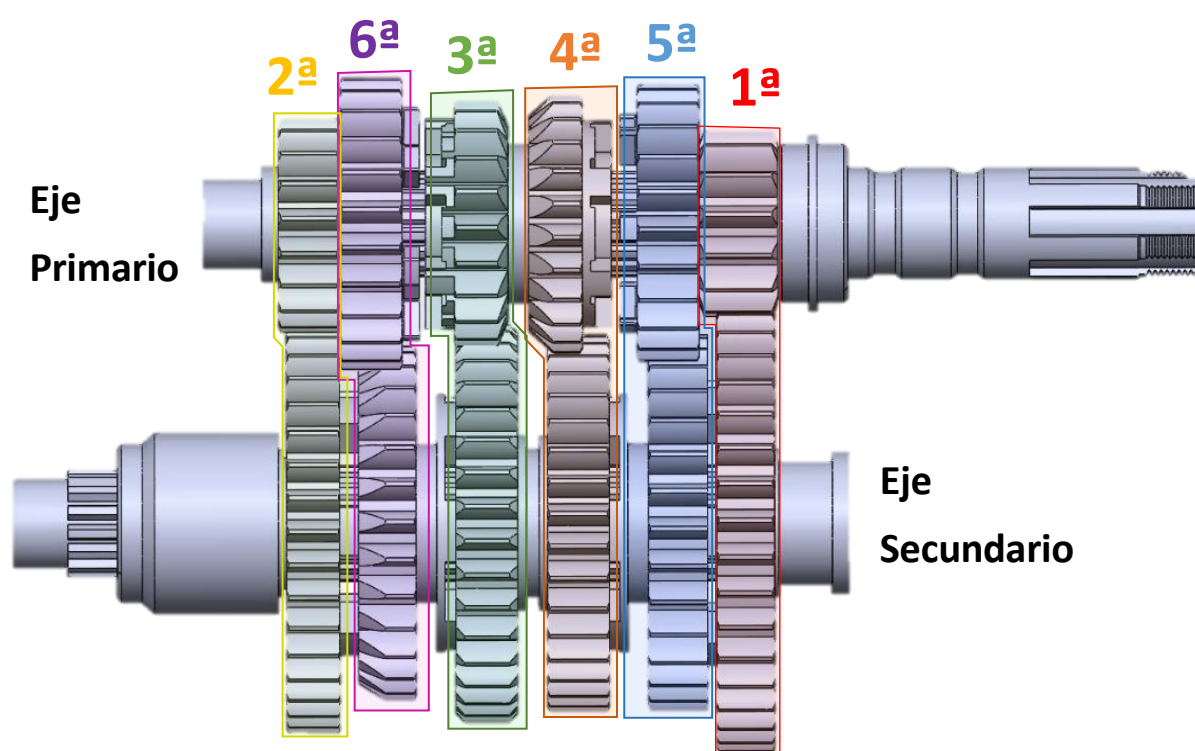
El cambio de marchas que se va a modelar es el de la motocicleta Suzuki GSXR 600 K7. Este cambio de marchas se compone de un total de 17 piezas, sin contar los rodamientos, que no serán modelados.

Estas piezas se dividen en: eje primario, eje secundario y 12 engranajes. Estos últimos se dividirán según la posición y movimiento que desempeñen dentro del sistema:

- Fijos dependientes: no tienen movimiento lineal sobre el eje y tienen unión rígida con el eje.
- Fijos independientes: no tienen movimiento lineal sobre el eje y no tienen unión rígida con el eje.
- Móviles: tienen un movimiento lineal y unión rígida sobre el eje.

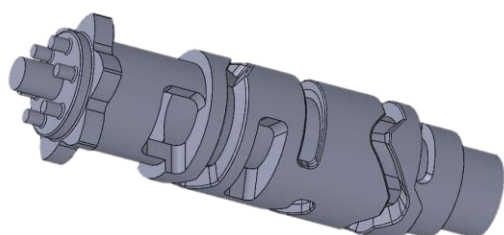
El eje primario se formará de: 2 engranajes fijos dependientes (engranajes de la 1ª y 2ª transmisión), 2 engranajes fijos independientes (engranajes de la 5ª y 6ª transmisión) y 2 engranajes móviles (engranajes de la 3ª y 4ª transmisión). Los 2 engranajes móviles forman una misma pieza por lo que serán desplazados por la misma horquilla selectora.

El eje secundario se formará de: 4 engranajes fijos independientes (engranajes de la 1ª, 2ª, 3ª y 4ª transmisión) y 2 móviles (engranajes de la 5ª y 6ª transmisión), donde cada uno de los móviles será desplazado por una horquilla selectora.

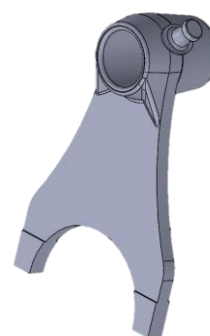


**Figura 1.** Definición de las transmisiones (Fuente: propia)

Por otra parte, se tendrá un tambor selector y 3 horquillas que irán conectadas a las guías del tambor y a los engranajes móviles.



**Figura 2.** Tambor (Fuente: propia)



**Figura 3.** Horquilla (Fuente: propia)



## 2.2. Diseño de los elementos del sistema de transmisión

### 2.2.1. Diseño de los engranajes e inputs para su modelación con programas CAD

El diseño de los engranajes es un tema complejo de resolver debido a los parámetros que se tienen que tener en cuenta. Como la finalidad de este proyecto es el estudio de los programas CAD, se explicará cómo se modelarán los engranajes a partir de las variables obtenidas de un sistema de cambio de marchas real. En el anejo A.4 se explica los cálculos aplicados para la obtención de estas variables a partir del sistema de transmisión real. En el siguiente apartado se mostrará una tabla con las variables necesarias para la modelación de los engranajes.

#### 2.2.1.1. Variables para el modelaje de los dientes:

**Tabla 1.** Variables para el diseño de los dientes de los engranajes (Fuente: propia)

Eje Primario	z	m (mm)	Db (mm)	Dp (mm)	Di (mm)	De (mm)	Pc (mm)
Engranaje 1ª	14	2,64	31,70	36,98	30,38	42,26	8,30
Engranaje 2ª	19	2,41	41,03	45,86	39,83	50,69	7,58
Engranaje 3ª	21	2,46	46,67	51,58	45,44	56,49	7,72
Engranaje 4ª	24	2,33	51,33	56,00	50,17	60,67	7,33
Engranaje 5ª	23	2,59	54,44	59,63	53,15	64,81	8,14
Engranaje 6ª	24	2,64	58,11	63,40	56,79	68,68	8,30
Eje secundario	z	m (mm)		Dp (mm)	Di (mm)	De (mm)	Pc (mm)
Engranaje 1ª	39	2,64	97,74	103,02	96,42	108,30	8,30
Engranaje 2ª	39	2,41	89,31	94,14	88,10	98,97	7,58
Engranaje 3ª	36	2,46	83,51	88,42	82,28	93,33	7,72
Engranaje 4ª	36	2,33	79,33	84,00	78,17	88,67	7,33
Engranaje 5ª	31	2,59	75,19	80,37	73,89	85,56	8,14
Engranaje 6ª	29	2,64	71,32	76,60	70,00	81,89	8,30

También para modelar el perfil de los dientes se utilizará la ecuación de envolvente:

$$x = \frac{Db}{2} \cdot (\cos(t) + t \cdot \sin(t)) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$y = \frac{Db}{2} \cdot (\sin(t) - t \cdot \cos(t)) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

### **2.2.2. Diseño del tambor e inputs para su modelación**

Como se ha comentado anteriormente, el diseño del tambor se realizará a partir de un entorno definido. También se podrá evaluar si los resultados de la simulación pueden combinarse de cara al rediseño de componentes.

## **2.3. Definición del movimiento de los componentes del conjunto para la simulación**

Para la simulación del cambio de marchas es necesario conocer el funcionamiento del conjunto a simular, así como, la disposición y la relación geométrica entre los componentes que forman el conjunto.

El mecanismo una vez ensamblado funcionará de la siguiente manera:

El eje primario recibe una velocidad angular de entrada que proviene de un reductor primario, que se encuentra en la salida del cigüeñal. Mediante la relación de transmisión de los engranajes del eje primario con los engranajes del eje secundario se transmitirá la velocidad angular de entrada al eje secundario, obteniendo una velocidad angular de salida.

En el cambio de marchas, para cambiar de una transmisión a otra, se utiliza un tambor selector y tres horquillas. A medida que el tambor selector va rotando, las horquillas selectoras son desplazadas por unas guías que tiene el tambor y, a su vez, desplazan el engranaje móvil. Estos engranajes móviles mediante unos salientes se conectan al engranaje fijo independiente para transmitir el movimiento al eje. Su otra función será transmitir ellos mismos el movimiento.

Estos movimientos serán los inputs para ejecutar la simulación.

- (1) Velocidad angular de entrada
- (2) Velocidad angular de salida
- (3) Desplazamiento angular del tambor
- (4) Desplazamiento lineal horquilla 1 / Engranaje 5ª
- (5) Desplazamiento lineal horquilla 2 / Engranaje 6ª
- Desplazamiento lineal horquilla 3 / Engranaje 3ª4ª

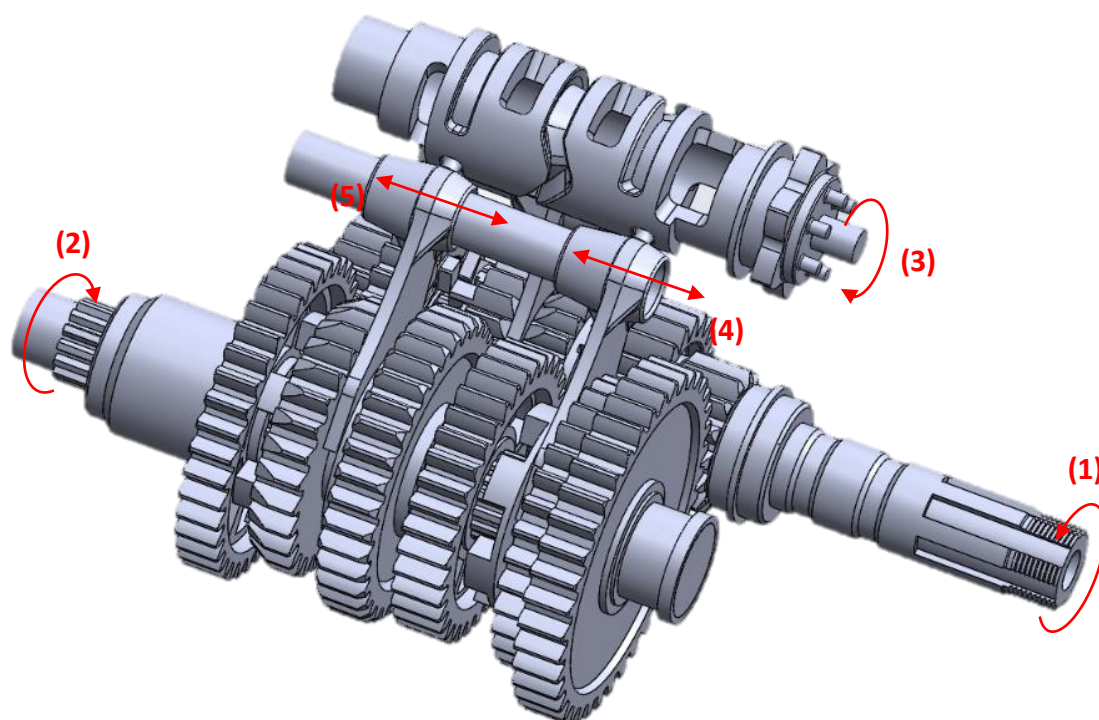


Figura 1. Inputs para ejecutar la simulación (Fuente: propia)

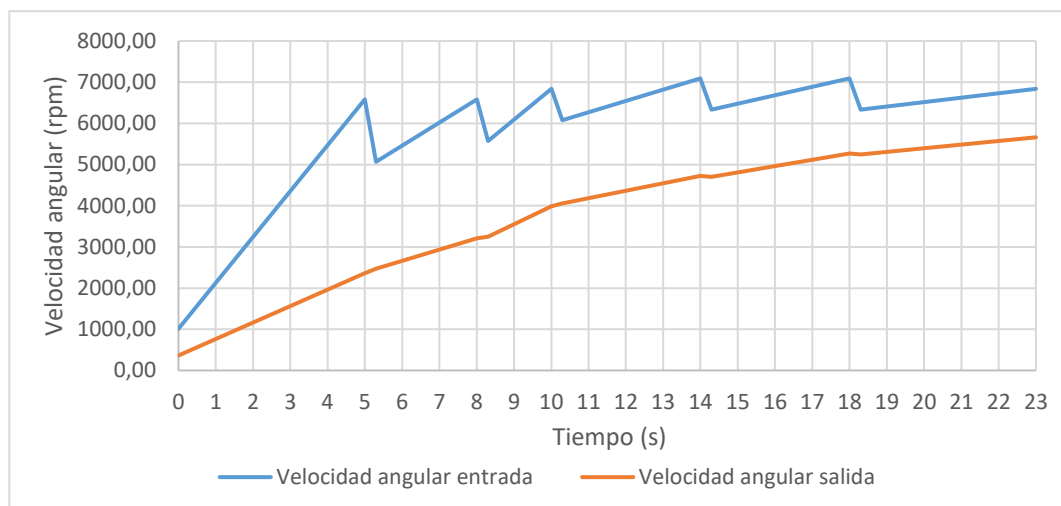
## 2.4. Inputs para ejecutar la simulación

Los inputs para la simulación del cambio de marchas se han obtenido a partir de un caso propuesto en el que se hace trabajar el cambio de marchas desde la primera marcha hasta la sexta. El caso propuesto se muestra en la Tabla 2, Tabla 3, Gráfica 1 y Gráfica 2.

Tabla 2. Velocidad angular de entrada y salida en la transmisión (Fuente: propia)

Marcha	Tiempo (s)	Velocidad angular salida motor (rpm)	Velocidad angular entrada transmisión (rpm)	Velocidad angular salida transmisión (rpm)
1	0	2000	1013,17	363,80
	5	13000	6585,61	2364,67
2	5,3	10000	5065,86	2468,74
	8	13000	6585,61	3209,36

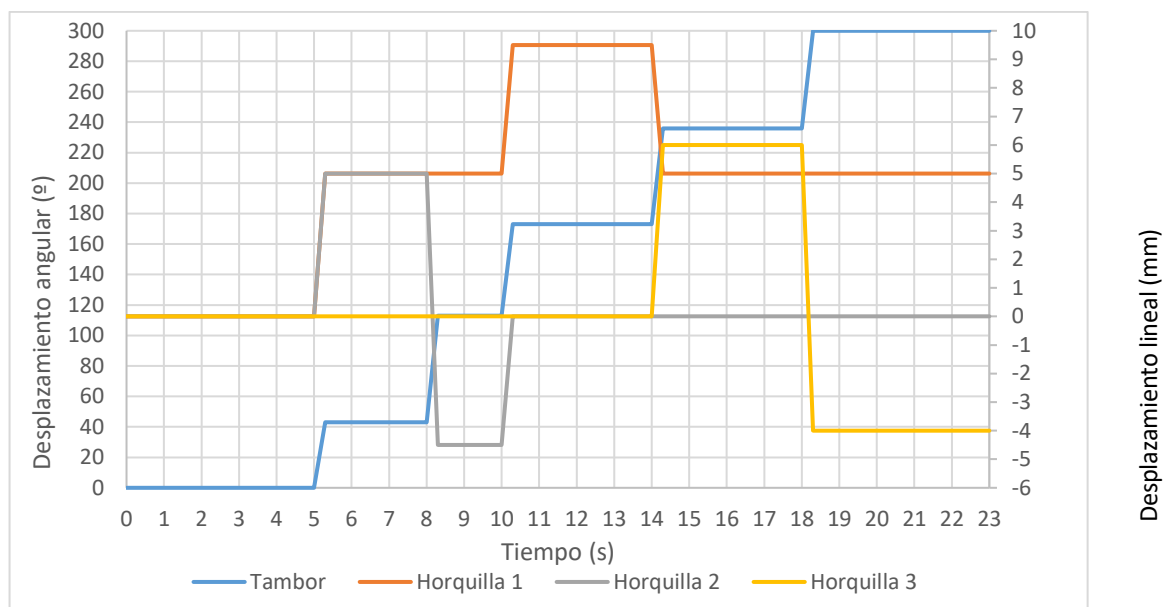
<b>3</b>	8,3	11000	5572,44	3251,13
	10	13500	6838,91	3990,03
<b>4</b>	10,3	12000	6079,03	4052,68
	14	14000	7092,20	4728,13
<b>5</b>	14,3	12500	6332,32	4701,05
	18	14000	7092,20	5265,18
<b>6</b>	18,3	12500	6332,32	5241,99
	23	13500	6838,91	5661,35



**Gráfica 1.** Velocidad angular de entrada y salida en la transmisión (Fuente: propia)

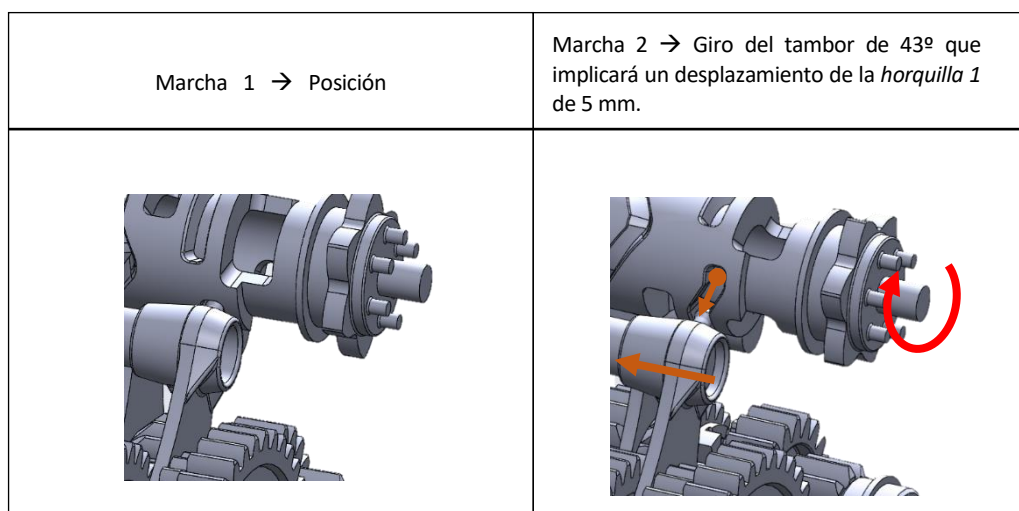
**Tabla 3.** Desplazamiento angular tambor y desplazamiento lineal horquillas (Fuente: propia)

Marcha	Tiempo (s)	Desplazamiento angular tambor (º)	Desplazamiento lineal horquilla 1 (mm)	Desplazamiento lineal horquilla 2 (mm)	Desplazamiento lineal horquilla 3 (mm)
<b>1</b>	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
<b>2</b>	5,3	47	5	5	0
	8	47	5	5	0
<b>3</b>	8,3	113	5	-4,5	0
	10	113	5	-4,5	0
<b>4</b>	10,3	175	9,5	0	0
	14	175	9,5	0	0
<b>5</b>	14,3	236	5	0	6
	18	236	5	0	6
<b>6</b>	18,3	299	5	0	-4
	23	299	5	0	-4



**Gráfica 2.** Desplazamiento angular tambor y desplazamiento lineal horquillas (Fuente: propia)

Se tomará como punto de referencia inicial para el desplazamiento del tambor y las horquillas, la posición que ocupen estos elementos cuando esté puesta la primera marcha. La figura X muestra un ejemplo del movimiento que se producirá entre el tambor y la *horquilla 1*.



**Figura 5.** Desplazamiento angular tambor y desplazamiento lineal *horquilla 1* entre el segundo 5-5,3 (Fuente: propia)

## 3. Diseño cambio de marchas

### 3.1. Introducción a los módulos de diseño

El modelaje del cambio de marchas se divide en diferentes procedimientos de diseño mediante los softwares CAD. Por una parte, se modelarán los engranajes mediante la creación de parámetros y estos se utilizarán para la creación de tablas de diseño. Desde la misma base de operaciones, se pueden obtener los diferentes tipos de engranajes que forman el conjunto de transmisión. Por otra parte, se observará como se interactúa en cada programa a la hora de modelar en un entorno definido. No se profundizará en la explicación del modelado de los ejes primarios y secundarios, ya que las operaciones que se utilizan son análogas a la creación de los engranajes, esto mismo sucede también con las horquillas. En último lugar, se modelarán y colocarán las piezas para obtener un entorno definido y se procederá al diseño del tambor.

En el proceso de diseño con programas CAD, las operaciones para la creación del sólido vienen reflejadas en un árbol de operaciones, donde se obtiene el “Knowhow de diseño”. Tanto CATIA V5 como SolidWorks trabajan de esta manera, pero cada programa tiene su propia estructura de árbol de diseño. Por una parte, CATIA V5 el procedimiento de diseño será “modular”, es decir, el sólido se encuentra diseñado en diferentes cuerpos, esta metodología nos permite obtener un árbol de operaciones ordenado en subcategorías.; por otra parte, en SolidWorks el procedimiento de diseño es secuencial, es decir, todas las operaciones son ordenadas de forma secuencial en el Featuremanager.

Para comparar la parte de modelaje con ambos programas se modelarán los Engranajes y horquillas con la utilización de tablas de diseño y ecuaciones. Por otra parte, el tambor será modelado a partir de un entorno de trabajo previamente definido. De esta manera englobamos dos métodos de diseño en el uso de programas CAD.

### 3.2. Diseño con CATIA V5

#### 3.2.1. Modelaje a partir de tablas de diseño y ecuaciones

Se comenzará creando las variables globales para la parametrización del engranaje mediante la herramienta *formula*.

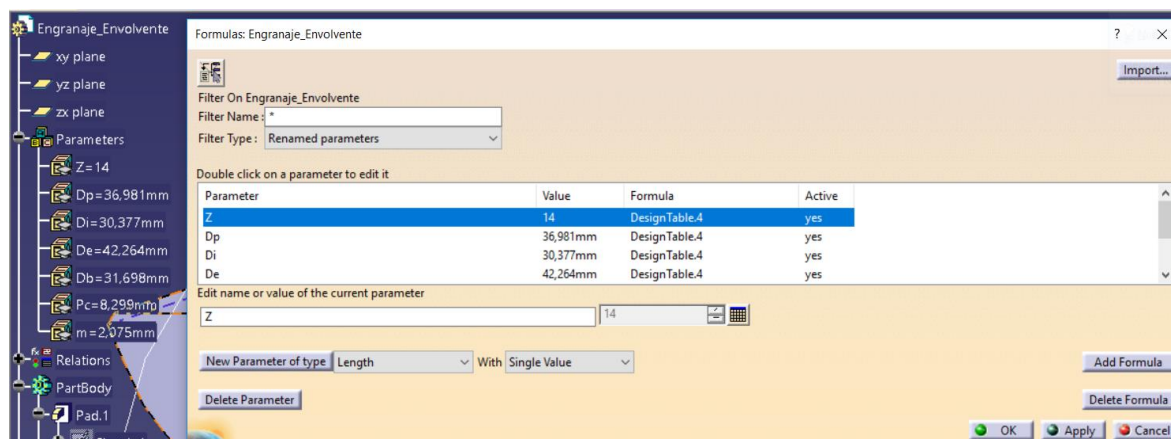


Figura 6. Variables globales (Fuente: propia)

Con las variables creadas, el siguiente paso será definir las ecuaciones de involuta que seguirán los perfiles de los dientes. La variable que nos dará el output de la ecuación (y) la definimos como *length* y obtendremos una distancia. Por otro lado, la variable t, que contiene la magnitud de ángulo, se le otorgará una magnitud real para no tener que utilizar unidades en la definición de la ecuación.

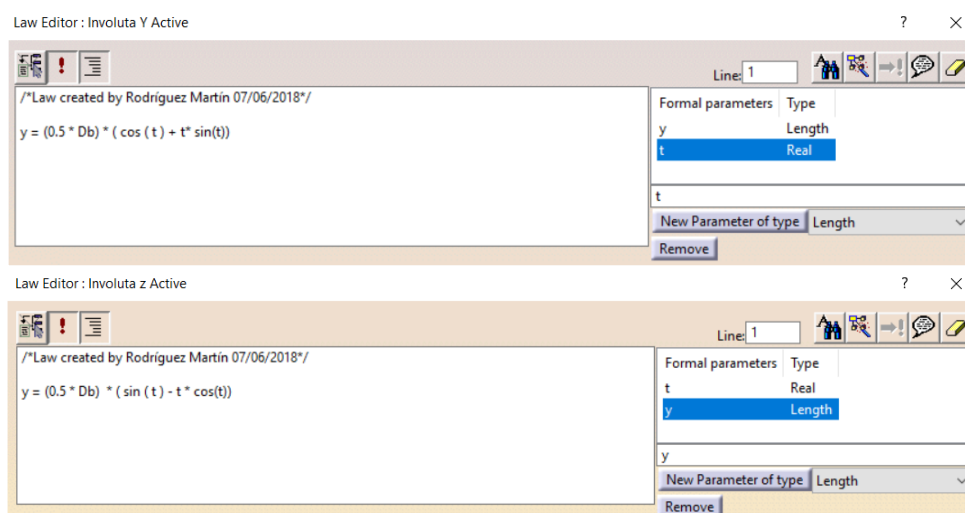
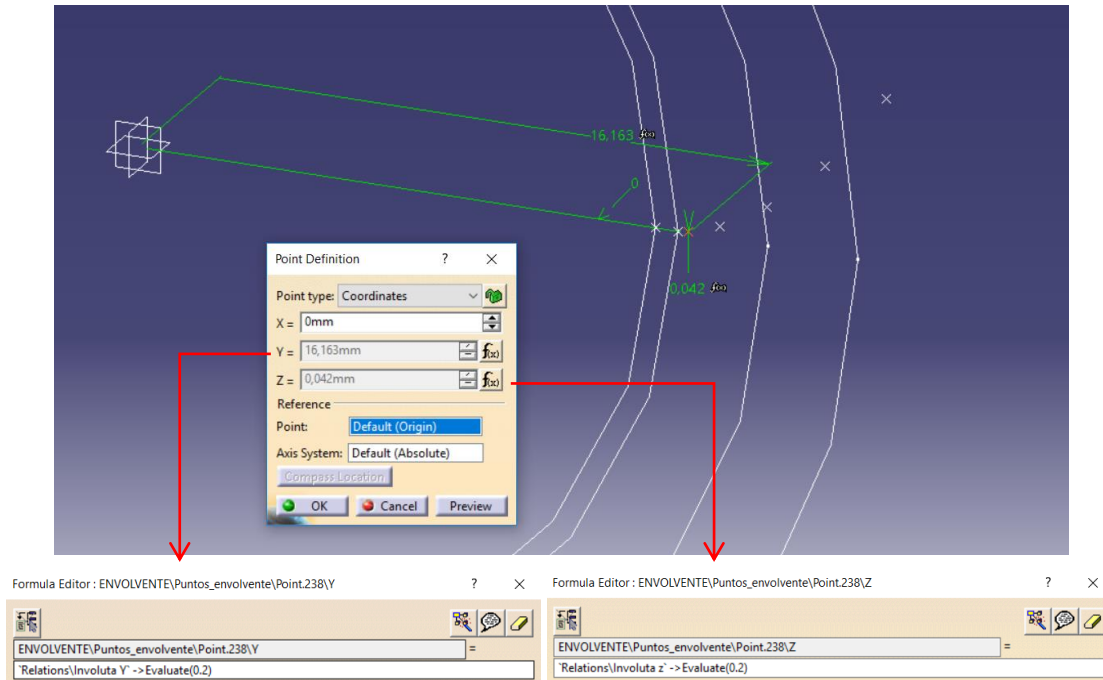


Figura 7. Definición de las ecuaciones evolventes (Fuente: propia)

En este punto ya se tienen definidos los inputs para el modelaje del engranaje. Se dividirá el *Knowhow* de diseño en dos partes: la primera estará compuesta por *geometrical set*, dónde se encontrarán los inputs (geometrías de referencia para la creación de los cuerpos sólidos), y la segunda se compondrá por *bodies*, que son los cuerpos sólidos junto a sus croquis.

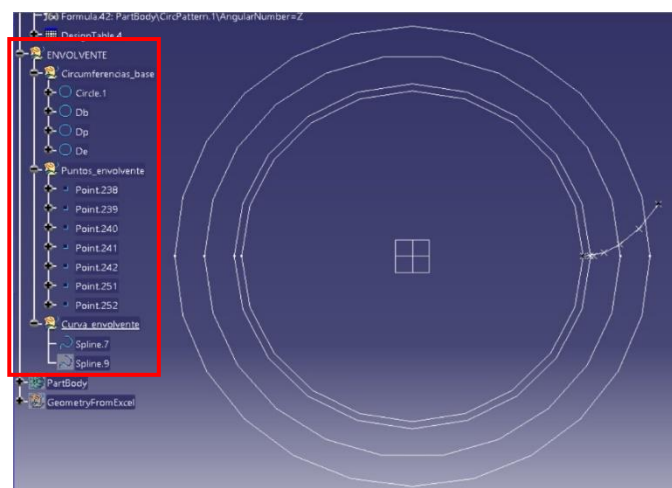
Se definirán los inputs: circunferencias: interior, base, paso y exterior, desde el módulo *Generative shape design* (GSD). En cambio, los *bodies* se definirán a partir del módulo *Part Design*.

En CATIA no se puede generar una *spline* a partir de una ecuación matemática de forma directa. Los puntos de la *spline* son los que se pueden posicionar según una ecuación. La *spline* se utilizará para crear los perfiles de los dientes. La ecuación de involuta se evaluará con valores entre 0 y 1.



**Figura 8.** Definición de puntos mediante las ecuaciones evolventes (Fuente: propia)

Por último, con la operación *spline*, crearemos una *spline* con estos puntos. El procedimiento se vuelve un poco tedioso al tener que definir los puntos uno a uno, y debido a esta definición *manual* de los puntos nos impide hacer una *spline* lo más acotada posible. El resultado final es el siguiente:

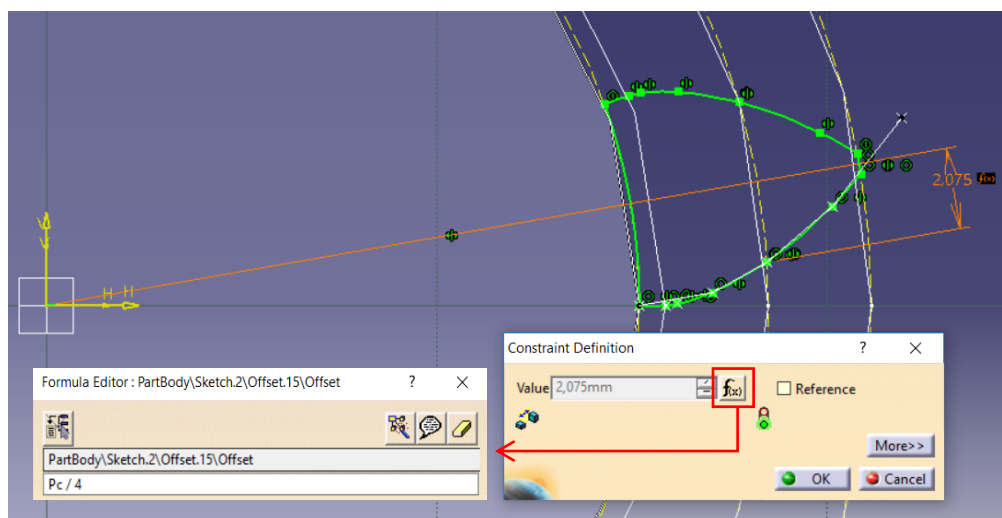


**Figura 9.** Inputs geométricos para el diseño del engranaje (Fuente: propia)



A partir de estas geometrías se definirán los *croquis*, que darán paso a su vez a los sólidos.

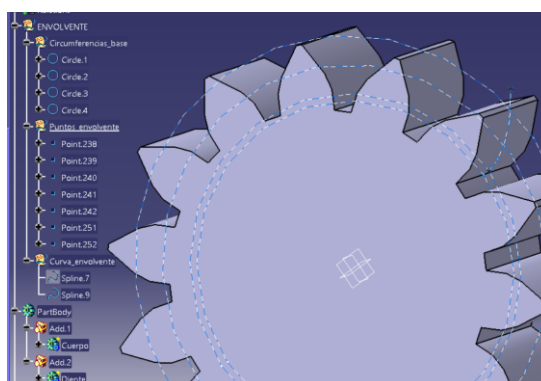
Se definirán dos *croquis*: uno para el cuerpo del engranaje y otro para los dientes. Estos a partir de restricciones se ajustarán a las geometrías de los *geometrical set*.



**Figura 10.** Sketch del dente del engranaje (Fuente: propia)

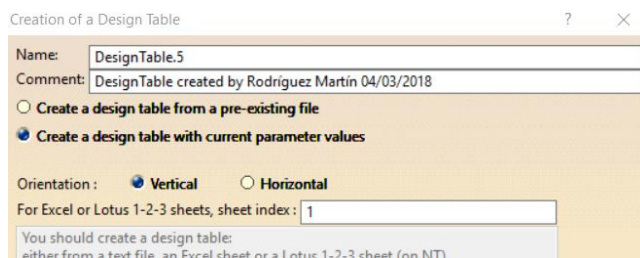
Las cotas de los *croquis* se relacionarán a los parámetros creados.

Cada operación de extrusión estará definida en un *body* concreto. Definidos los *bodies*, mediante operaciones booleanas se unirán para formar el *body* engranaje.

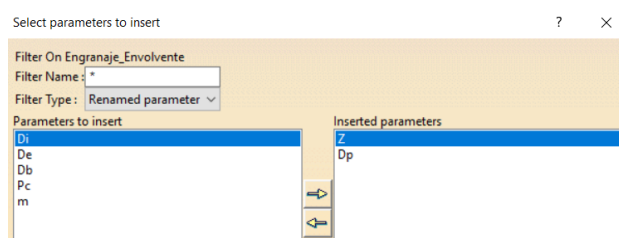


**Figura 11.** Engranaje (Fuente: propia)

La creación de una tabla de diseño se hará a partir de las variables creadas previamente.



**Figura 12.** Creación tabla de diseño (Fuente: propia)



**Figura 13.** Definición parámetros globales en tabla de diseño (Fuente: propia)

Se abrirá una hoja Excel en la que se podrán añadir más valores a las variables.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Z	Dp (mm)	Di (mm)	De (mm)	Db (mm)	Pc (mm)	m (mm)
2	14	36,9811321	30,3773585	42,2641509	31,6981132	8,29854663	2,07463666
3							
4							

**Figura 14.** Tabla de diseño (Fuente: propia)

El resto de la geometría de los engranajes se modelará mediante sketches y utilizando operaciones de creación de volumens sólidos como la herramienta *pad*. La tabla se deberá ir actualizando manualmente a medida que se vaya modificando la geometría.

### 3.2.2. Diseño a partir de un entorno previamente definido

Para poder efectuar este tipo de modelaje se necesita información previa de puntos realizados en la simulación y obtención de resultados. Los pasos a seguir serán:

1. Definición del mecanismo para tener el entorno definido.
2. Diseño del cuerpo base del tambor.

3. Ejecución de la simulación definida mediante leyes gráficas.
4. Obtención de resultados de las trazas de ruta de las horquillas sobre el cuerpo base del tambor.
5. Diseño de las guías sobre el cuerpo base del tambor.

### 3.2.2.1. Definición del mecanismo para tener el entorno definido

Una vez llegado a este punto, seguiremos los pasos mencionados en el apartado 4.2.1. *Definición de mecanismo*. En este apartado se explica cómo se relacionan las piezas entre ellas, utilizando restricciones geométricas para crear un conjunto de piezas ensambladas.

### 3.2.2.2. Diseño del cuerpo base del tambor a partir del entorno

Se creará una pieza nueva (*Part*) dentro del ensamblaje (*Product*).

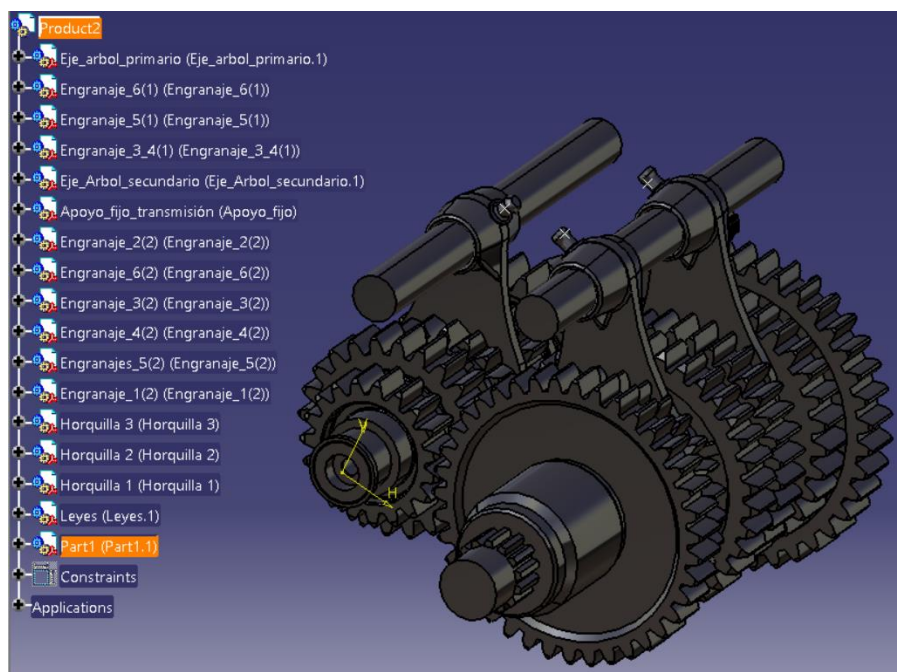


Figura 15. *Product* (Fuente: propia)

La ventaja de poder diseñar a partir de un entorno es que se puede diseñar la pieza en la posición que vaya a tener respecto al eje de coordenadas global del sistema. Antes de modelar el tambor, se requiere de la creación de un eje de coordenadas local respecto a las coordenadas globales. Este se creará a partir de tres planos definidos sobre el entorno. En nuestro caso se han hecho planos con relación de distancia de los planos que forman el eje de coordenadas global. Posicionados los planos, a *grosso modo* en la posición en la que va a estar el tambor, con la herramienta intersección creamos

líneas a partir de la intersección de los planos. Estas líneas marcarán las direcciones del eje de coordenadas local.

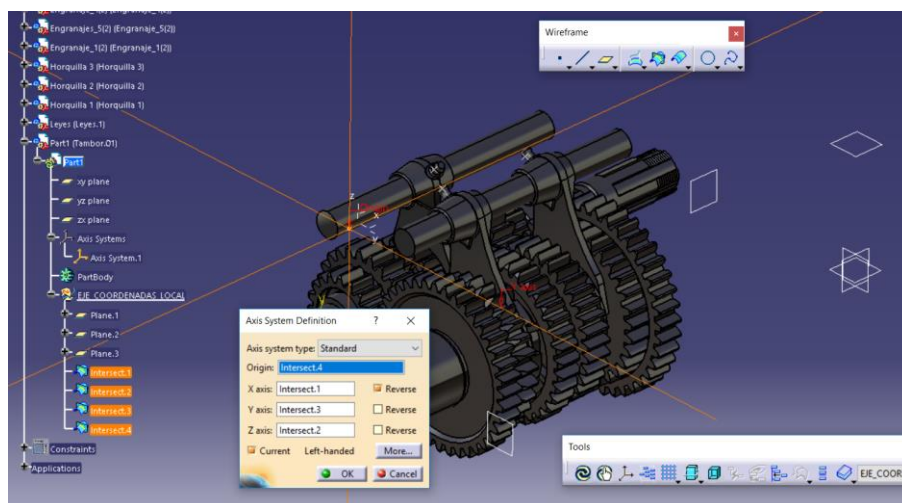


Figura 16. Creación eje de coordenadas local (Fuente: propia)

Definido el eje de coordenadas local, se creará un *sketch* y se dibujará la circunferencia de la cual se extraerá el cilindro que formará el cuerpo base del tambor.

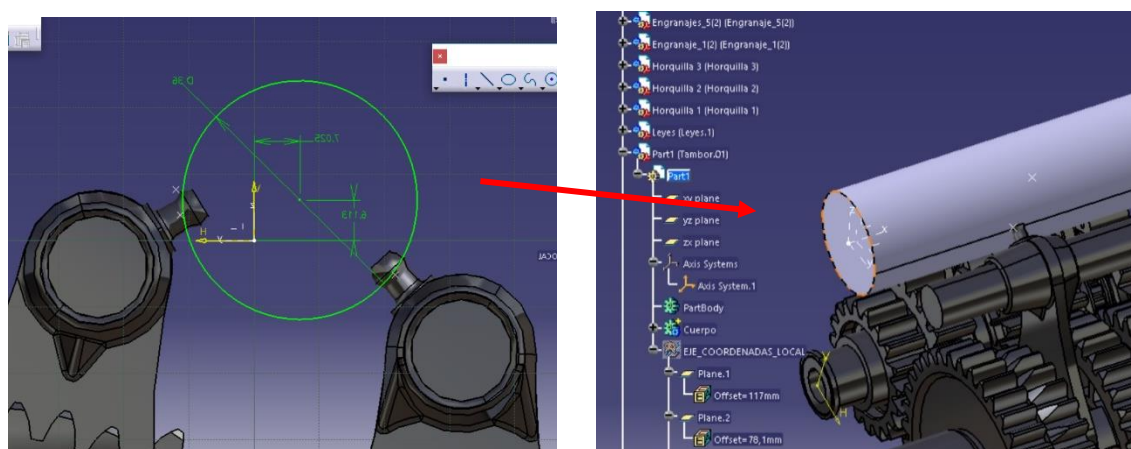


Figura 17. Creación del cuerpo base del tambor (Fuente: propia)

### 3.2.2.3. Ejecución de la simulación definida mediante leyes gráficas

Se simulará el movimiento de las horquillas mediante leyes gráficas con el *DMU Kinematics*. Se hace un inciso en el apartado 4.2.1. *Definición de mecanismos*.

#### 3.2.2.4. Obtención de resultados de las trazas de ruta de las horquillas sobre el cuerpo base del tambor

De la simulación del movimiento de las horquillas se extraerá el trazado de su movimiento respecto la rotación del cilindro. Extraer este tipo de resultado se explica de forma detallada en el apartado 4.2.3. *Resultados.*

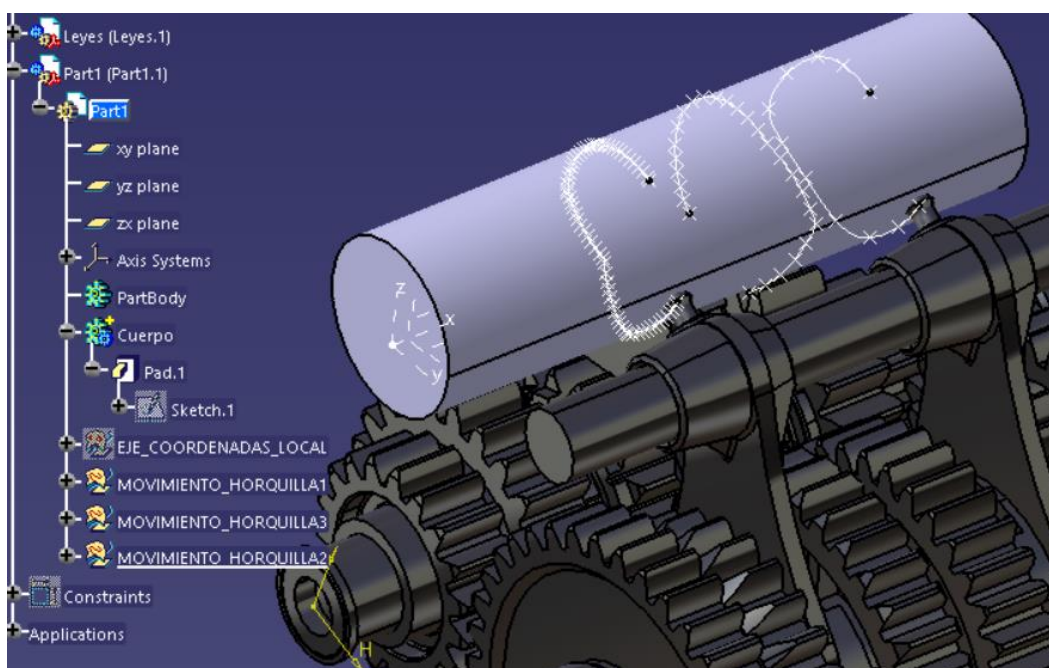
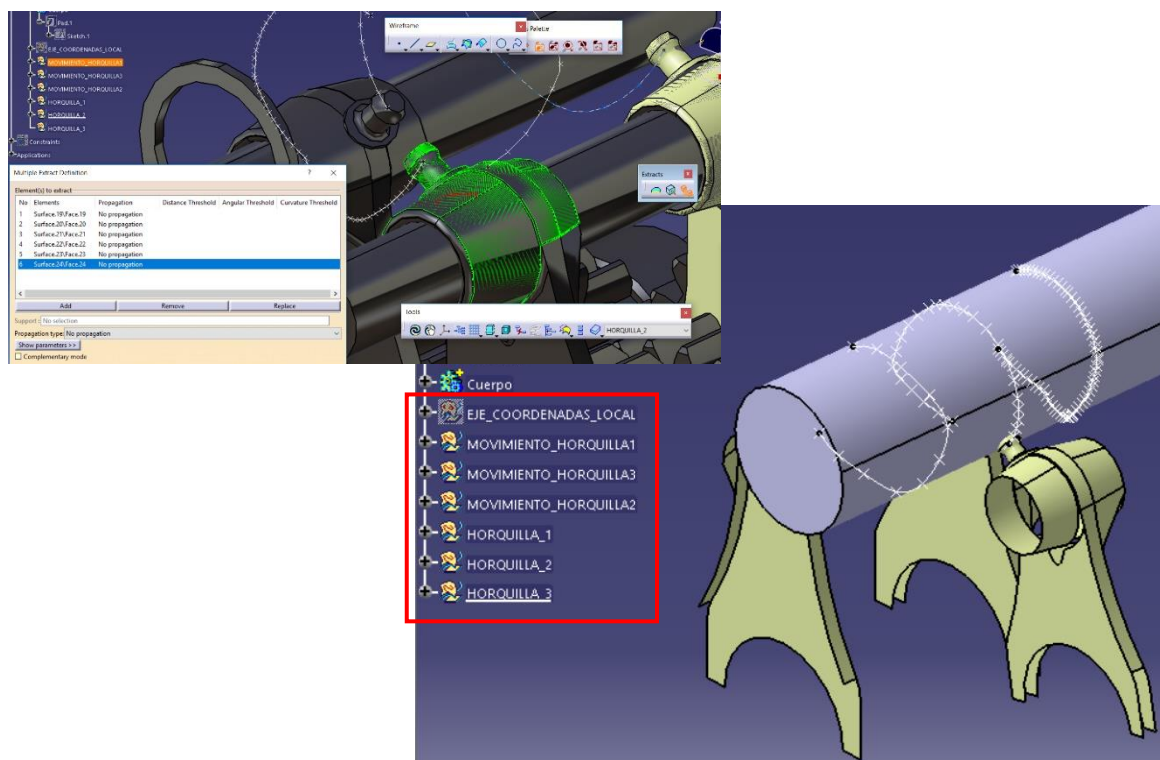


Figura 18. Trazas de ruta de las horquillas (Fuente: propia)

#### 3.2.2.5. Diseño de las guías sobre el cuerpo base del tambor

Con estos trazos se podrá modelar las guías que contiene el tambor para transmitir su desplazamiento angular a un desplazamiento lineal en las horquillas. A parte del movimiento, también extraeremos el volumen que ocupan las horquillas en su posición inicial extrayendo las superficies que conforman el entorno de las horquillas con la herramienta *extract*.

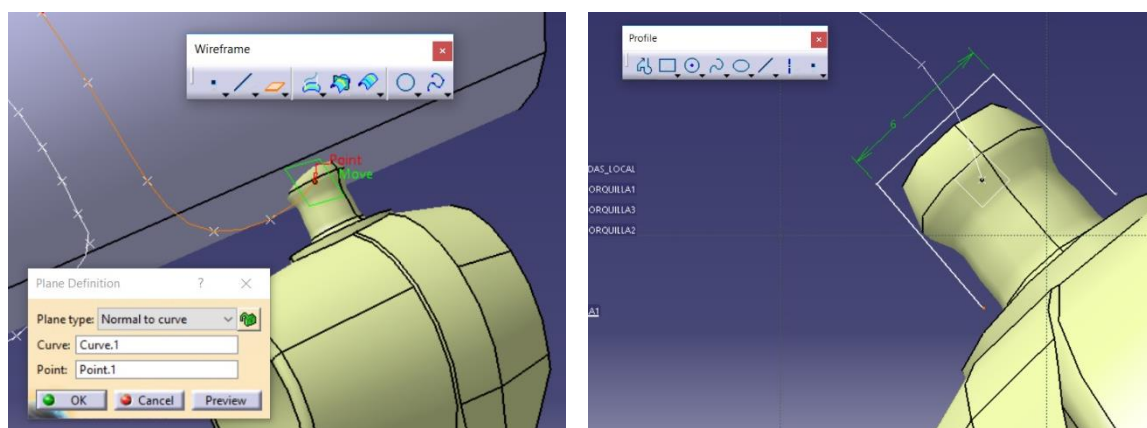




**Figura 19.** Superficies de las horquillas (Fuente: propia)

Una vez que ya disponemos del entorno plasmado en nuestra geometría, podemos trabajar fuera del entorno, para hacer más cómodo el proceso de modelaje. Como ya se ha explicado anteriormente, estos inputs para el modelado del tambor serán creados en *geometrical set* (figura 19).

El contorno de las guías será creado a partir de un *sketch* que se apoyará en un plano normal al trazado. Las cotas del croquis vendrán definidas por el entorno, en este caso el cabezal de la horquilla.



**Figura 20.** Creación del sketch de la curva guía (Fuente: propia)

Con el *croquis* definido, ya se puede extraer el contorno de la guía utilizando la herramienta *sweep* proyectando el *croquis* a lo largo de la curva. Se acabarán de cerrar los contornos de la guía y se redondearán sus vértices.

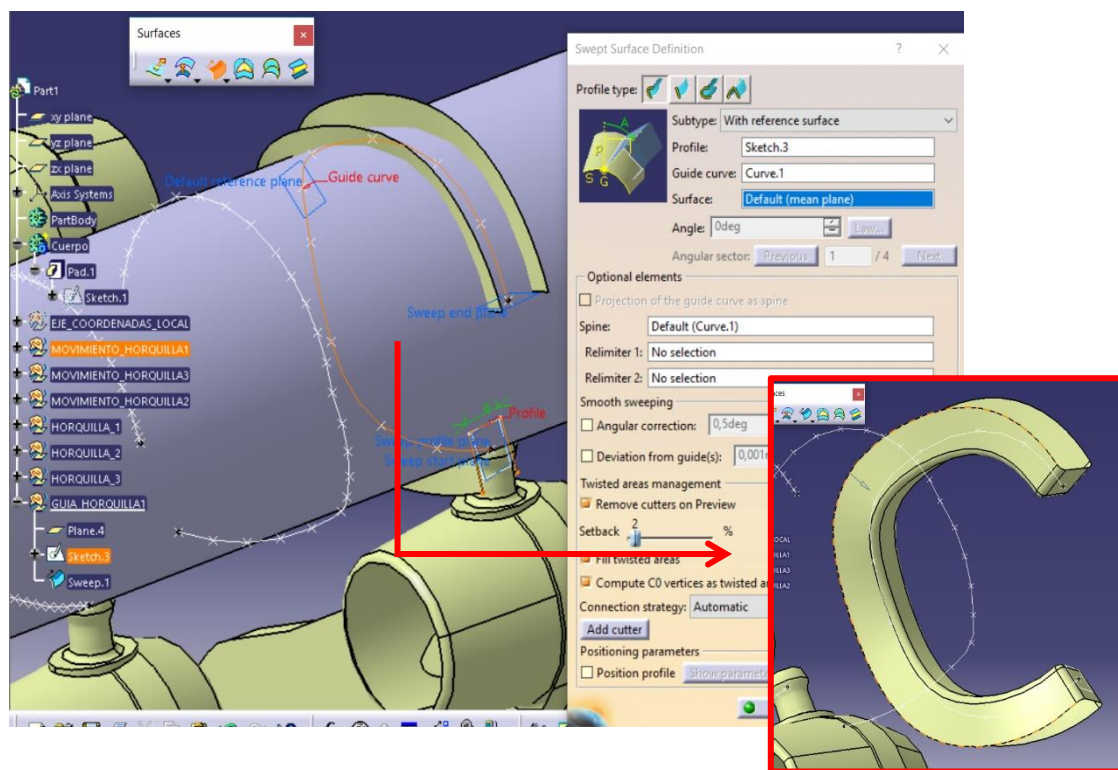


Figura 21. Creación de la curva guía (Fuente: propia)

Por último, se cortará el cuerpo del tambor con la geometría compleja que forma la guía mediante la herramienta *split*.

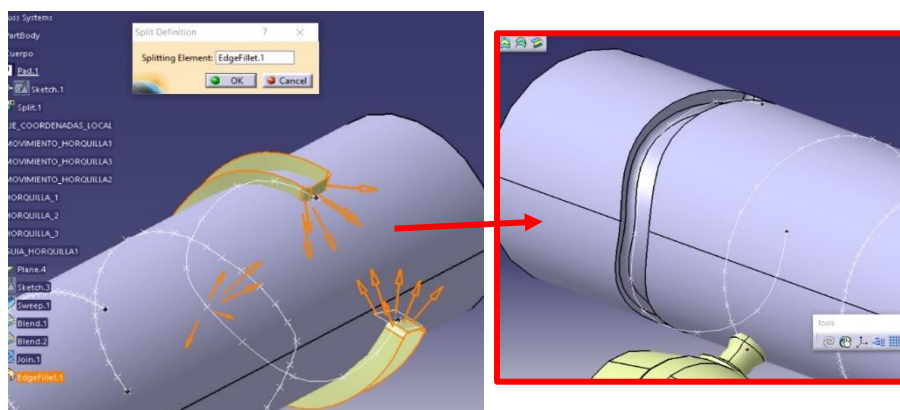
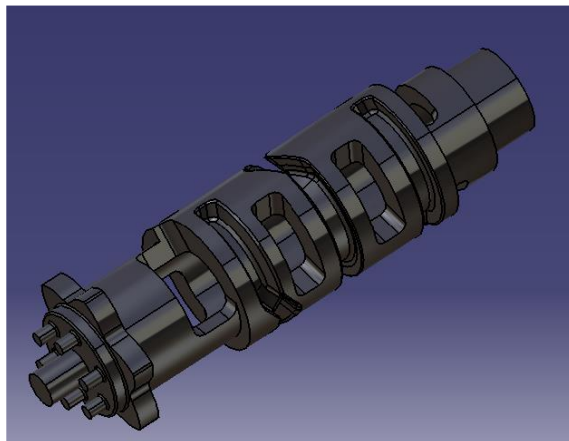


Figura 22. Creación de la curva guía en el cuerpo base del tambor (Fuente: propia)

Aplicar el mismo procedimiento para crear las dos guías restantes. Las demás partes del tambor serán creadas de forma sencilla a partir de *sketches* y *bodies*. El resultado final es el que se muestra en la siguiente figura.

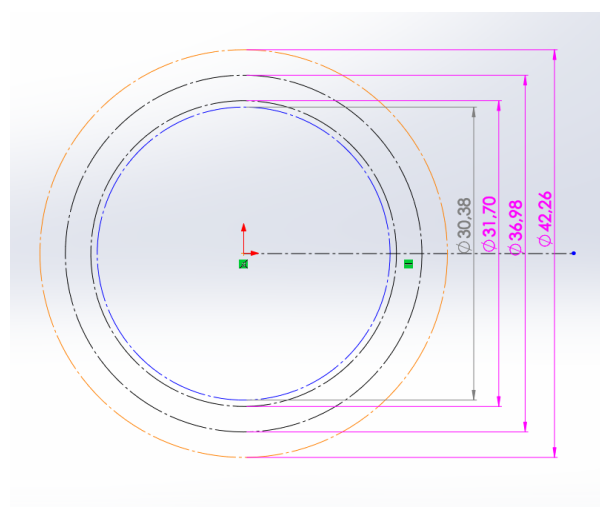


**Figura 23.** Resultado final del tambor (Fuente: propia)

### 3.3. Diseño con SolidWorks

#### 3.3.1. Modelaje a partir de tablas de diseño y ecuaciones

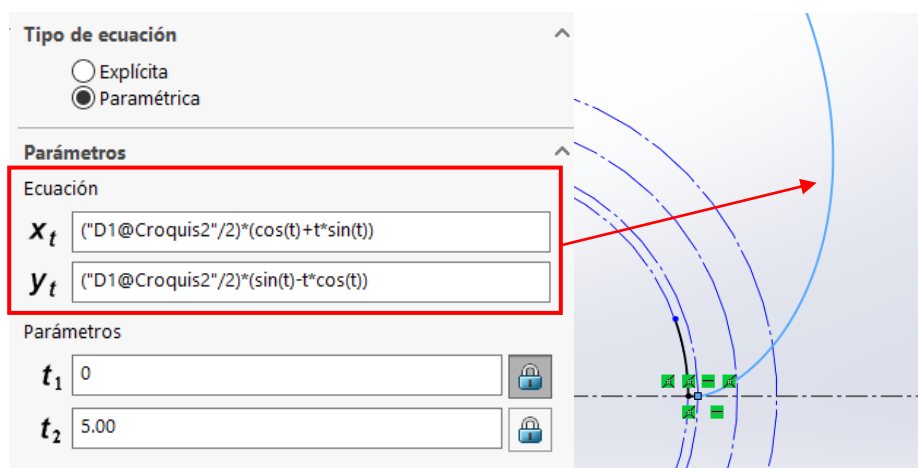
Se comenzará creando el *sketch* base del diente. Éste, constará de las circunferencias interior, base, primitivo y exterior; respectivamente.



**Figura 24.** Circunferencias para la creación del diente (Fuente: propia)

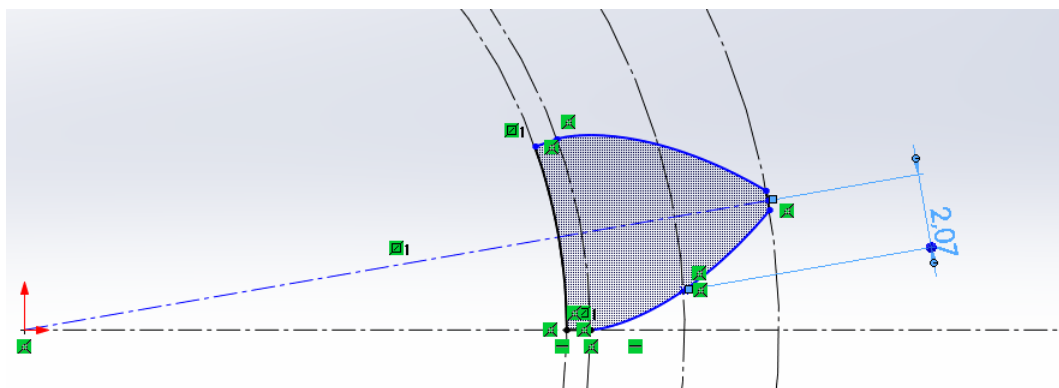


Sobre este sketch se dibujará el perfil del diente. Mediante la herramienta *curva conducida por ecuación* se podrá dibujar la función evolvente de forma directa en un *sketch*. En esta herramienta, se seleccionará la creación de una ecuación del tipo paramétrica y se escribirán las ecuaciones evolventes sin unidades.



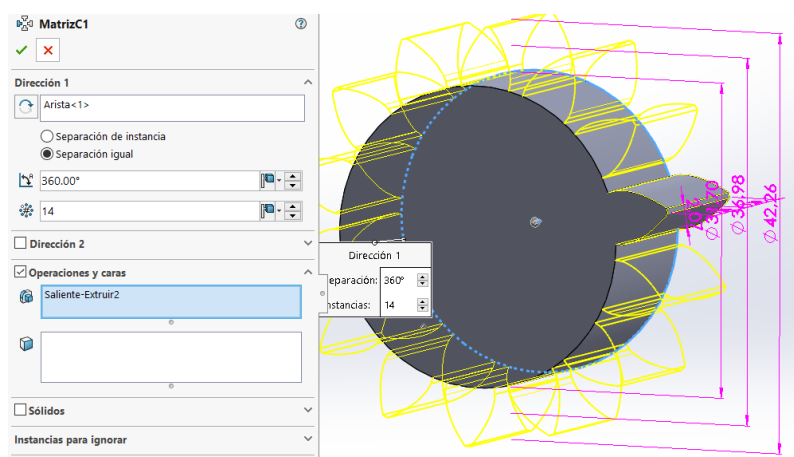
**Figura 25.** Creación del perfil evolvente (Fuente: propia)

Utilizando restricciones de sketch y herramientas del propio sketch, se dibujará el diente en base a la ecuación paramétrica.



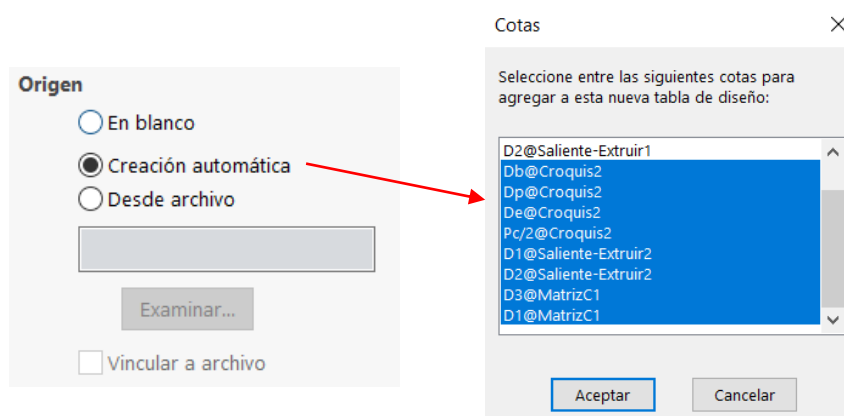
**Figura 26.** Creación del sketch del diente (Fuente: propia)

Se extruirá el diente y el cuerpo base del engranaje, y se utilizará la herramienta *matriz* para crear los dientes restantes.



**Figura 27.** Creación de los dientes restantes (Fuente: propia)

El siguiente paso, antes de trasladar las cotas de las operaciones realizadas a una tabla de diseño, se renombrarán estas cotas con los nombres de los inputs. Definidos los nombres de las cotas, se creará una tabla de diseño de forma automática y se elegirán las cotas cambiadas con los nombres de los *inputs*.



**Figura 28.** Creación tabla de diseño (Fuente: propia)

Se obtendrá una tabla de diseño vinculada a nuestra geometría 3D.

Para acabar de diseñar el engranaje se seguirán creando nuevos sketches y mediante herramientas de creación de volúmenes se añadirán nuevas formas al engranaje. Solamente será necesario ir actualizando la tabla de forma manual con los nuevos parámetros que se vayan creando.

### 3.3.2. Diseño a partir de un entorno previamente definido

En SolidWorks se utilizarán los mismos pasos que en CATIA V5 para el diseño en un entorno definido:

1. Definición del mecanismo para tener el entorno definido.
2. Diseño del cuerpo base del tambor.
3. Ejecución de la simulación definida mediante segmentos.
4. Obtención de resultados de las trazas de ruta de las horquillas sobre el cuerpo base del tambor.
5. Diseño de las guías sobre el cuerpo base del tambor.

#### 3.3.2.1. Definición del mecanismo para tener el entorno definido.

Una vez llegado a este punto, seguiremos los pasos mencionados en el apartado 4.3.1. *Definición de relaciones de posición*. En este apartado se explica cómo se relacionan las piezas entre ellas, utilizando restricciones geométricas para crear un conjunto de piezas ensambladas.

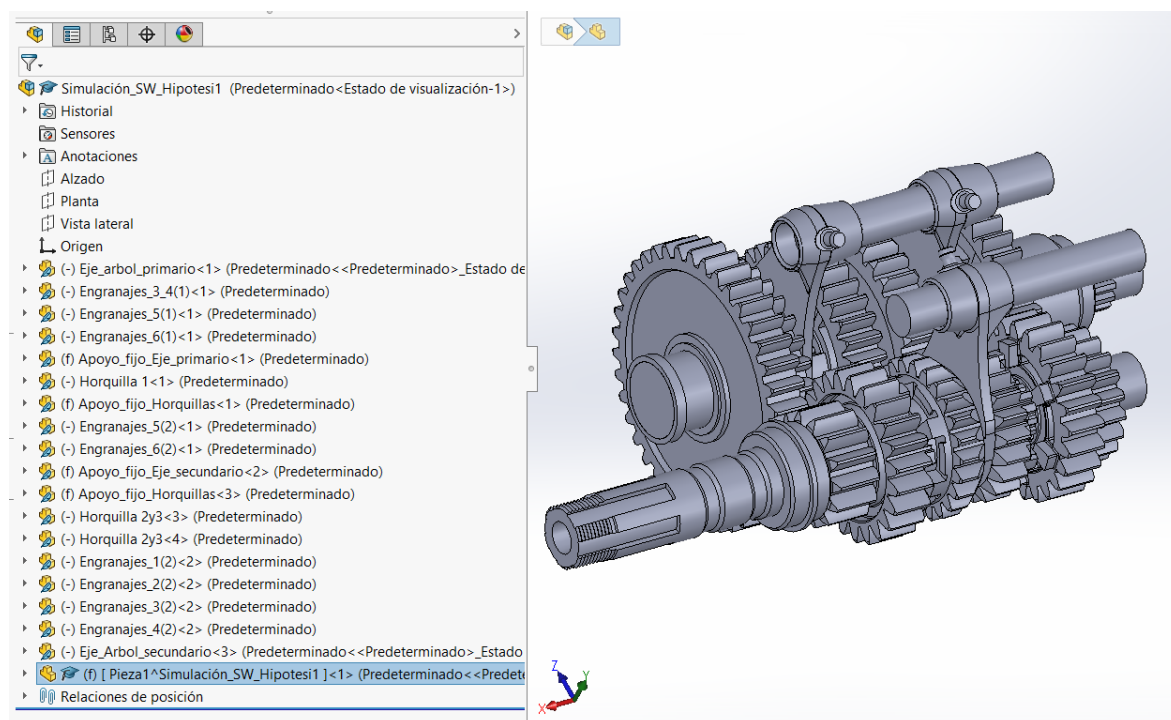


Figura 29. Ensamblaje cambio de marchas sin tambor (Fuente: propia)

### 3.3.2.2. Diseño del cuerpo base del tambor

Se creará una pieza nueva dentro del ensamblaje, será la denominada tambor. Para empezar a modelar sobre un entorno definido, se requiere la creación de un sistema de coordenadas local, respecto al sistema global. Se formarán tres planos, de los cuales la intersección formada entre ellos generará tres ejes que marcarán las direcciones del eje de coordenadas local.

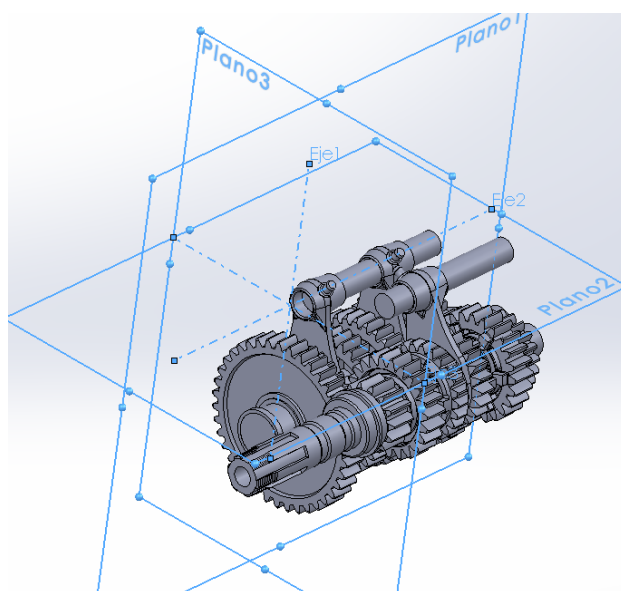


Figura 30. Creación eje de coordenadas global (Fuente: propia)

Definido el eje de coordenadas local, se creará un *sketch* y se dibujará la circunferencia de la cual se extraerá el cilindro, que formará el cuerpo base del tambor.

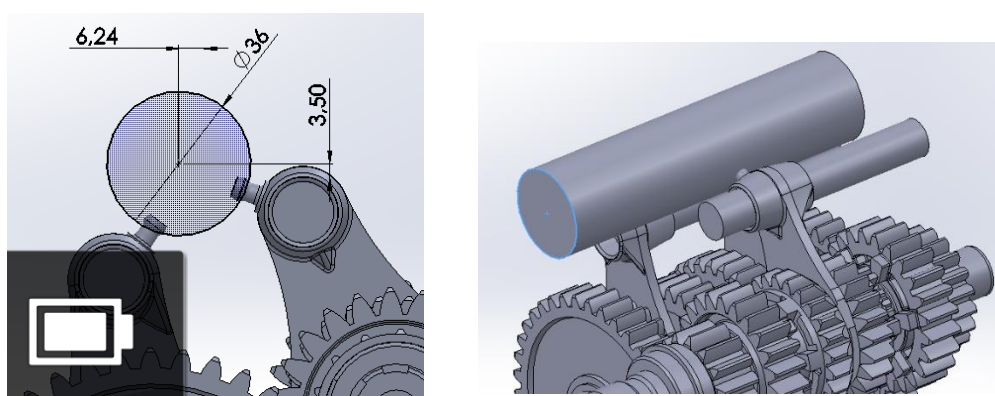


Figura 31. Creación del cuerpo base del tambor (Fuente: propia)

### 3.3.2.3. Ejecución de la simulación definida mediante segmentos

Se simulará el movimiento de las horquillas mediante *SolidWorks Motion*. Se hace un inciso en el apartado 4.3.1. *Definición de relaciones de posición*.

### 3.3.2.4. Obtención de resultados de las trazas de ruta de las horquillas sobre el cuerpo base del tambor

De la simulación del movimiento de las horquillas se extraerá el trazado de su movimiento respecto la rotación del cilindro. La obtención de estos datos se explica en el apartado 4.3.4. *Resultados*.

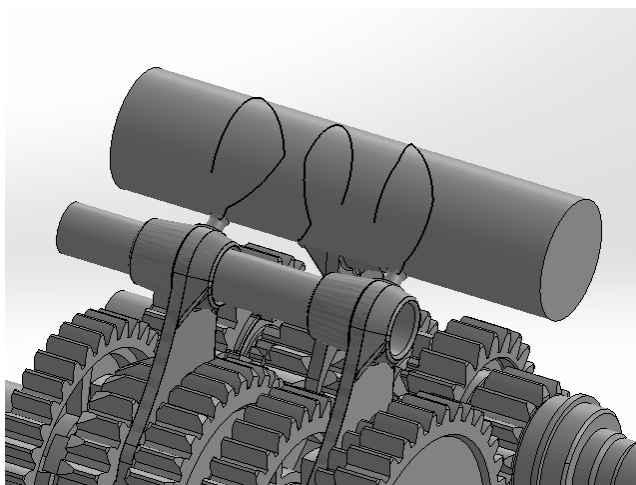


Figura 32. Ruta de trazo de las horquillas (Fuente: propia)

### 3.3.2.5. Diseño de las guías sobre el cuerpo base del tambor

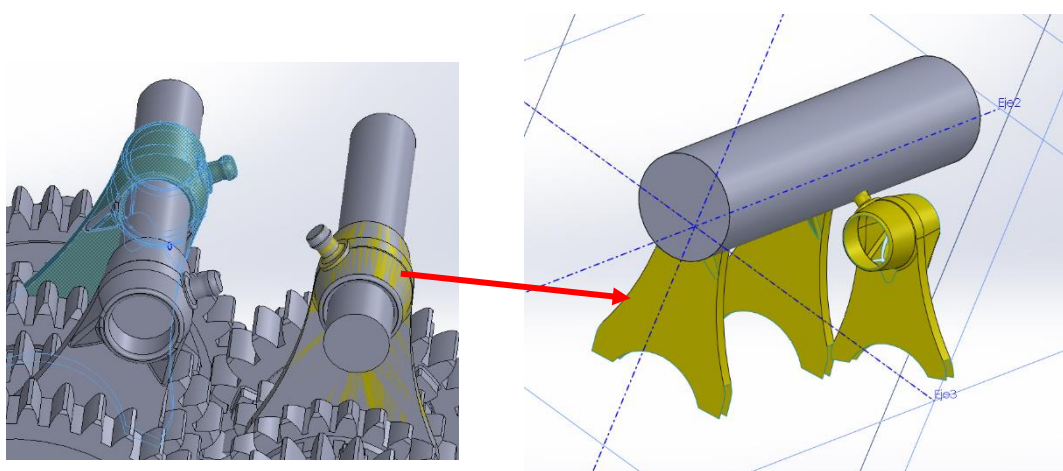
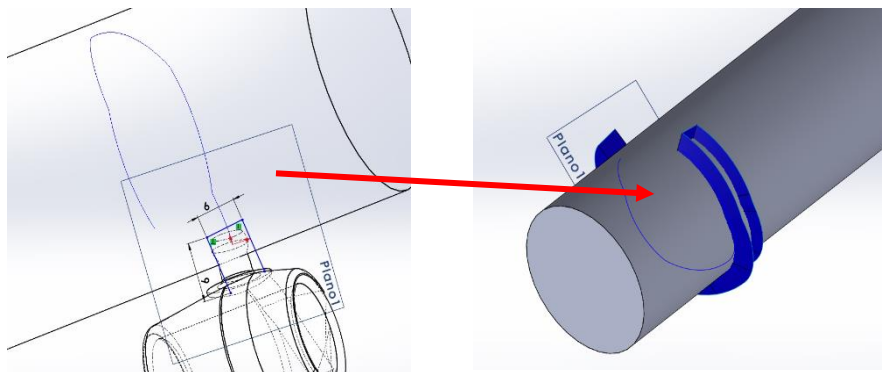


Figura 33. Superficies de las horquillas (Fuente: propia)

Las líneas de trazos simulan el movimiento de la horquilla, el cual es necesario para saber qué forma tendrán las guías del cilindro. Para obtener el ancho de la guía necesitaremos saber el volumen de las horquillas, el cual obtendremos a partir de la herramienta denominada *equidistar superficies*.

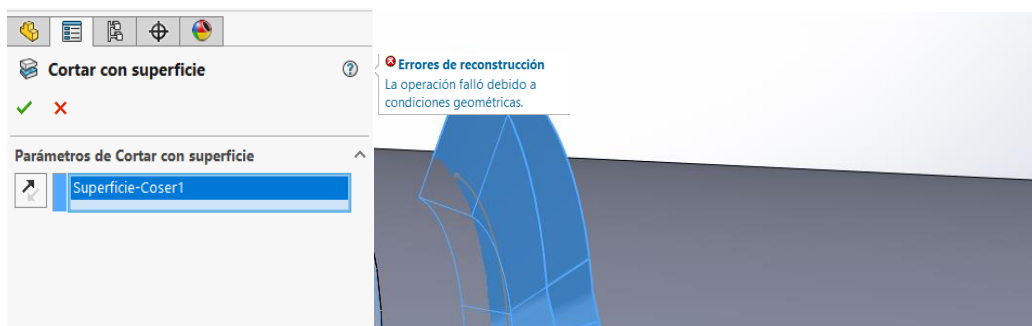
De esta forma, dentro de nuestra propia pieza ya tendremos plasmado el entorno que interacciona directamente con ella y podremos empezar a trabajar.

El contorno de las guías será creado a partir de un sketch que se apoyará en un plano normal al trazado. Las cotas del croquis vendrán definidas por el entorno, en este caso, el cabezal de la horquilla, tal y como se muestra en la figura 34. Por último, con la herramienta *barrer superficie*, se obtendrá el perfil de la curva guía.



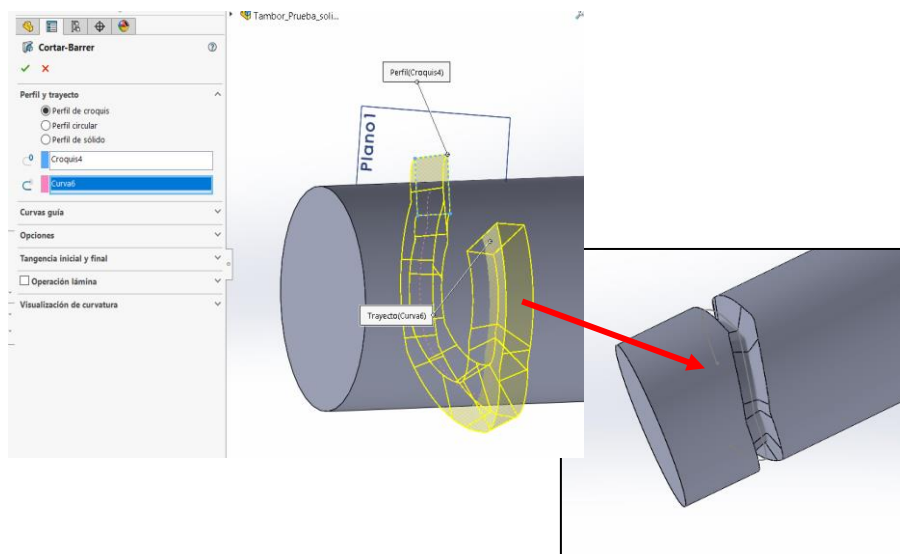
**Figura 34.** Creación *sketch* de la curva guía (Fuente: propia)

Con la superficie obtenida, se cortará el sólido. Cuando aplicamos la operación de corte mediante superficie, SolidWorks nos devuelve un mensaje de error. Esto es debido a la complejidad geométrica que tiene la superficie creada.



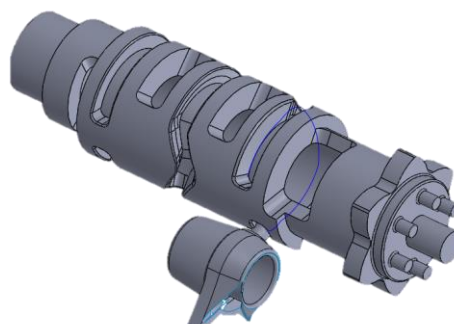
**Figura 35.** Creación de la curva guía en la base del tambor mediante superficies (Fuente: propia)

Como no podemos cortar el cuerpo base del tambor con la superficie, lo haremos mediante la herramienta *barrido de base* y obtendremos el sólido cortado.



**Figura 36.** Creación de curva guía en el cuerpo base del tambor mediante corte entre sólidos (Fuente: propia)

Aplicar el mismo procedimiento para crear las dos guías restantes. Las demás partes del tambor serán creadas de forma sencilla a partir de *sketches* y operaciones de extrusión y recorte. El resultado final es el que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 37.** Resultado final del tambor (Fuente: propia)

## 4. Simulación cambio de marchas

### 4.1. Introducción a los módulos de simulación

Para comparar la simulación de ambos programas será preciso hacer una introducción a los módulos de simulación que contienen los softwares.

Antes de explicar en detalle cada módulo hay que explicar cómo se relaciona el ensamblaje con la simulación. CATIA V5 tiene separado el módulo de ensamblaje *Assembly Design* respecto al módulo de simulación *DMU Kinematics*. En *Assembly Design* sólo se podrán otorgar relaciones de posición básicas, creando una restricción geométrica denominada *Constraint* por operación. Por otra parte, en el *DMU Kinematics* se crearán relaciones de posición complejas, llamadas juntas, que se definirán a partir de la combinación de diferentes restricciones geométricas. Al tener las operaciones de relación en módulos separados, si existen restricciones geométricas creadas en el *Assembly Design* se deberán borrar y volver a crear nuevas desde el *DMU Kinematics*.

A diferencia de CATIA V5, SolidWorks en el módulo de ensamblaje trabaja con todos los tipos de relaciones de posición, desde las básicas (relaciones estándar) hasta las complejas (relaciones avanzadas y mecánicas). Por este motivo, el módulo de simulación de SolidWorks, denominado *SolidWorks Motion*, trabajará con las relaciones de posición predefinidas en el ensamblaje.

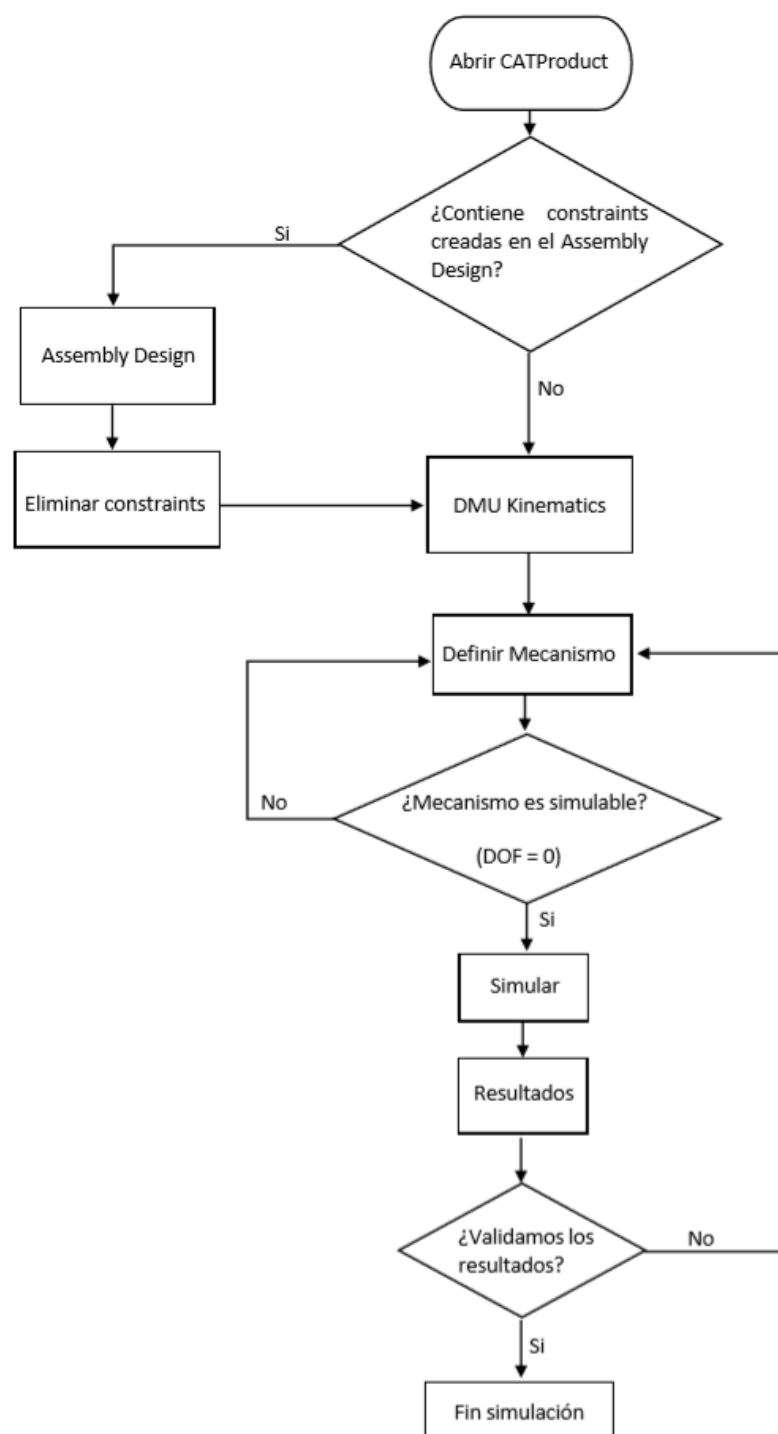
#### 4.1.1. DMU Kinematics

El software CATIA V5 contiene el módulo *DMU Kinematics* para la simulación cinemática de conjuntos, que trabaja directamente en el *Product* permitiendo definir mecanismos entre componentes, la simulación de sus movimientos y la recogida de los datos de las simulaciones.

##### 4.1.1.1. Método de trabajo *DMU Kinematics*

Para simular en CATIA V5 se seguirá el siguiente método de trabajo:



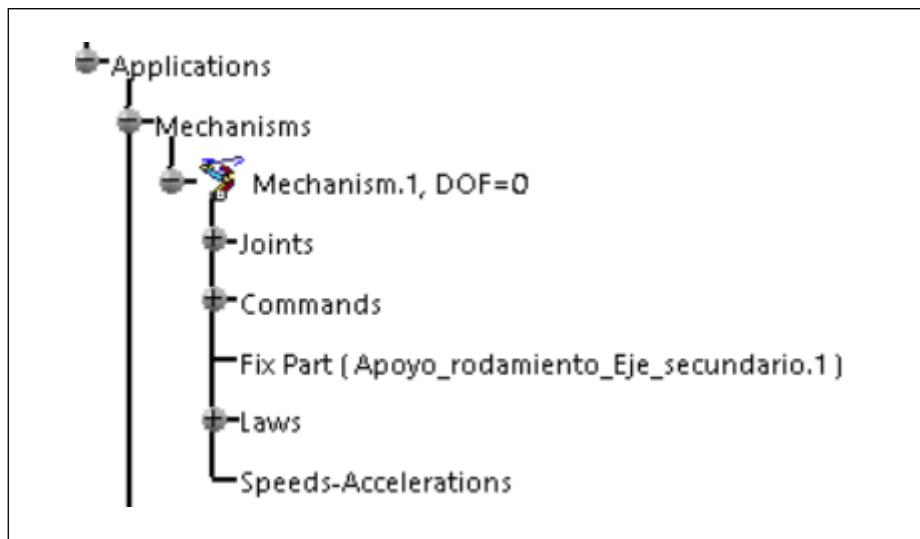


**Figura 38.** Diagrama de flujo del procedimiento de trabajo para la simulación en CATIA V5 (Fuente: propia)

#### 4.1.1.2. Definición de mecanismo

Los mecanismos que se definen en un *Product* cuelgan del árbol de operaciones en *Applications*. Los mecanismos se componen de:

- *Fix part*: servirá de referencia para el movimiento del resto de componentes.
- *Joints*: relacionan las piezas entre sí limitando los movimientos relativos posibles.
- *Commands*: se definen sobre algunas juntas cinemáticas para controlar el movimiento del mecanismo.
- *Laws*: son los inputs de entrada para controlar los comandos a partir de una expresión matemática.
- *Speeds-Accelerations*: outputs del mecanismo.



**Figura 39.** Sección *Applications* en árbol de operaciones CATIA V5(Fuente: propia)

Un mecanismo solo se podrá simular cuando se hayan eliminado (mediante juntas cinemáticas y comandos) todos los grados de libertad.

#### 4.1.1.3. Simulación

Se puede simular de dos formas diferentes:

- Simulación directa: consiste en simular el movimiento del mecanismo modificando a mano los valores de los comandos limitados por un rango establecido.
- Simulación por leyes: consiste en simular el movimiento del mecanismo mediante el uso de una expresión matemática o la función definida gráficamente.

#### 4.1.1.4. Resultados

Se pueden obtener dos tipos de resultados:

- Resultados de análisis
- Resultados de simulación

Resultados de análisis se componen de:

- Sensores para medir magnitudes cinemáticas: sensores de posición, sensores de velocidad y sensores de aceleración. Estos sensores nos darán una información gráfica y numérica.
- Interferencias y distancias: nos da los puntos de interferencia entre componentes ensamblados.
- Medidas: nos muestra las medidas entre componentes a lo largo de la simulación.
- Trazas: dibuja la traza de un punto seleccionado de un componente a lo largo de la simulación. El recorrido de la traza podrá tener como referencia la cara de otro componente.
- Envolvente de volumen: crea un volumen del recorrido que ha efectuado el componente seleccionado a lo largo de la simulación.

Resultados de Simulación se componen de:

- *Replay*: la grabación en secuencias del movimiento en la simulación.
- Secuencia: es la compilación de varios *replays*.

#### 4.1.1.5. Paletas de herramientas *DMU Kinematics*

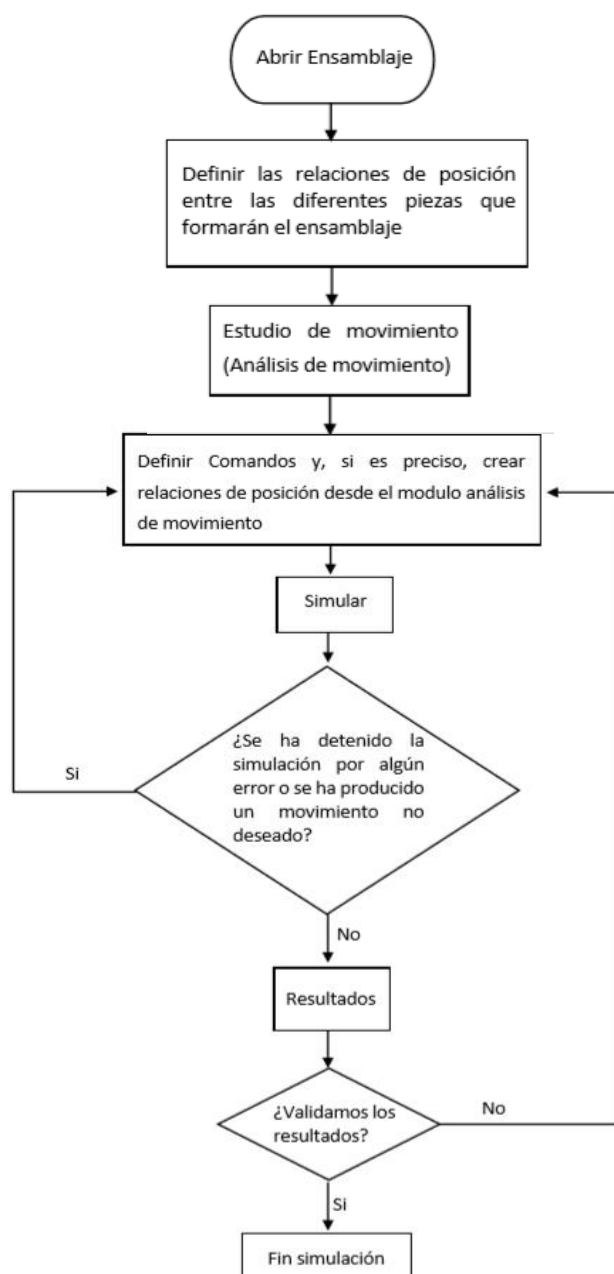
La explicación detallada de las paletas de herramientas del módulo *DMU Kinematics* se encuentra en el Anejo 6.

#### 4.1.2. SolidWorks Motion

El software SolidWorks contiene el complemento *Motion* para la simulación y análisis del movimiento de un ensamblaje. Este nos da paso, dentro del estudio de movimiento, al módulo *Análisis de movimiento* donde el ensamblaje será simulado mediante la definición de restricciones de movimiento, comandos (motores, fuerzas, resortes, amortiguadores), contactos entre componentes, propiedades de materiales (en caso de que se asignen) y la masa. Con todo esto podemos concretar que SW nos hace una simulación combinando: cinemática y dinámica.

#### 4.1.2.1. Método de trabajo *SolidWorks Motion*

Para la simulación de SolidWorks mediante el complemento *Motion* se procederá de la siguiente manera:



**Figura 40.** Diagrama de flujo del procedimiento de trabajo para la simulación en *SolidWorks Motion* (Fuente: propia)

#### 4.1.2.2. Definición de relaciones de posición

Las relaciones de posición se crean en el ensamblaje a nivel de *FeatureManager*. Estas operaciones relacionarán las piezas del ensamblaje entre si limitando los movimientos relativos posibles.

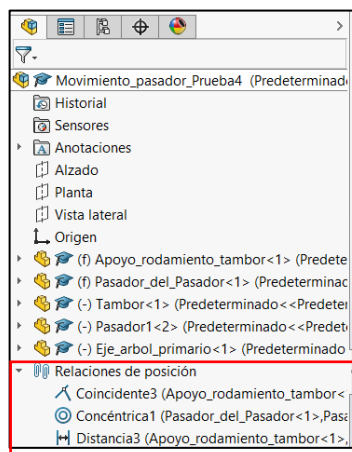
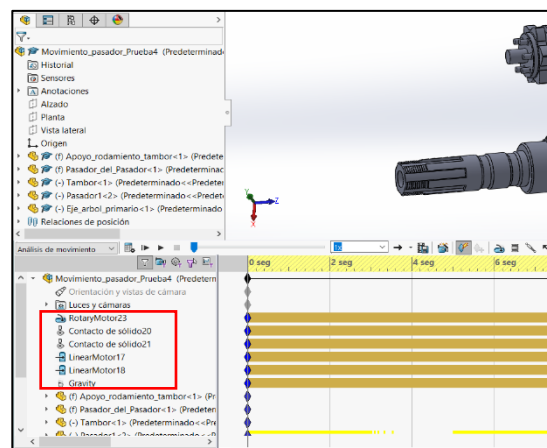


Figura 41. *FeatureManager* (Fuente: propia)

#### 4.1.2.3. Definición de comandos, contactos y creación o modificación de relaciones de posición desde estudio de movimiento

Cuando se crea un estudio de movimiento, se duplica el *FeatureManager*. De este modo lo obtendremos para el módulo ensamblaje y, por otra parte, el *MotionManager* para el módulo de simulación, que como bien hemos dicho antes mantiene las relaciones de posición creadas en el ensamblaje. Los comandos, contactos y gravedad colgarán del *MotionManager* de la simulación, también las relaciones de posición que se agreguen, eliminen o modifiquen desde aquí. Cada estudio de movimiento tiene su propio *MotionManager* creado a partir del ensamblaje.

- Comandos: el movimiento en la simulación se controlará mediante estos. Pueden ser: motores, fuerzas o muelles.
- Contactos: SolidWorks en la simulación nos permite transferir el movimiento, no sólo con relaciones de posición mecánicas (relaciones cinemáticas), sino mediante el contacto físico entre piezas (relaciones dinámicas).
- Gravedad.



**Figura 42.** MotionManager (Fuente: propia)

#### 4.1.2.4. Simulación

La simulación es controlada por los comandos (inputs). Los valores que toman los comandos están en función del tiempo.

#### 4.1.2.5. Resultados:

Se pueden obtener dos tipos de resultados:

- Resultados de análisis
- Resultados de simulación

Los resultados de análisis se componen de resultados de magnitudes cinemáticas y dinámicas. Como magnitudes cinemáticas obtendremos: desplazamiento, velocidad y aceleración. Como magnitudes dinámicas se obtendrán resultados de: fuerzas, momentos, energías y electricidad. Por último, también se podrán obtener rutas de trazo.

Los resultados de simulación serán obtenidos de la secuencia que recoge el movimiento de la ejecución de la simulación.

#### 4.1.2.6. Paleta de herramientas *Ensamblaje / Motion*

La explicación detallada de las herramientas del módulo *ensamblaje / Motion* se encuentra en el Anejo 5.

## 4.2. Simulación con CATIA V5

Para explicar el procedimiento de simulación en CATIA V5 se seguirán los puntos del diagrama de flujo [Nºdiagrama].

### 4.2.1. Definición de mecanismo

#### 4.2.1.1. Definición de juntas

Se abrirá el programa CATIA V5, por defecto se nos abre un *Product* que en este caso es el formato que necesitaremos. Desde *Start* abriremos el módulo *DMU Kinematics*.

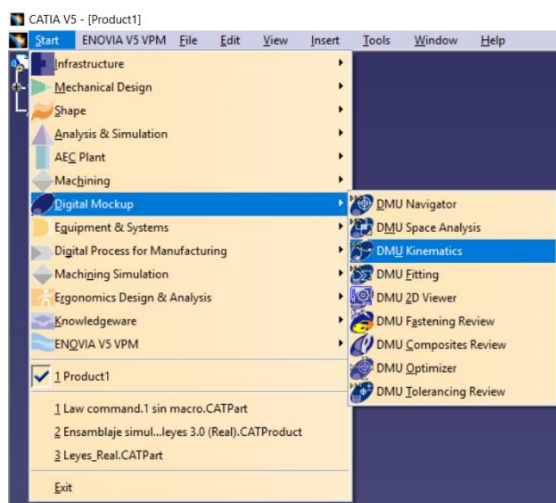


Figura 43. Menú *Start* (Fuente: propia)

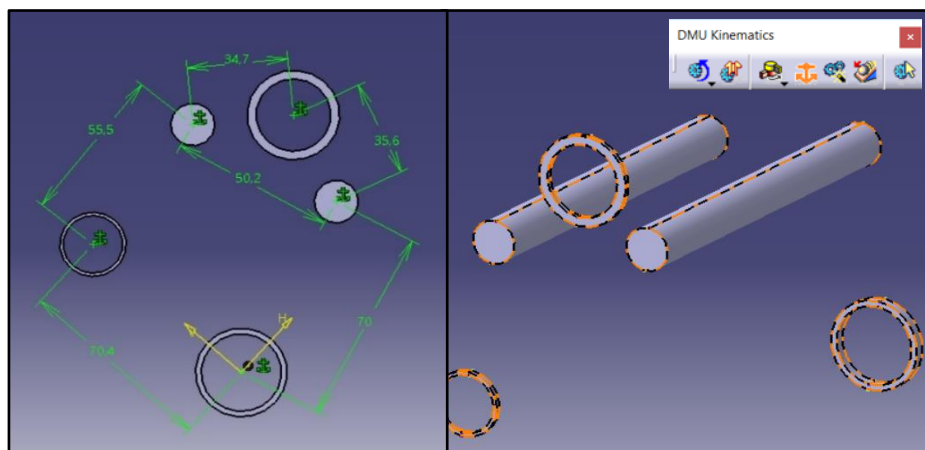
En nuestro caso, se valora que el cambio de marchas no es necesario ser ensamblado en el módulo *Assembly Design* antes de pasar al *DMU Kinematics*, sino que se puede ensamblar directamente con las juntas ayudándonos del compás para orientar y colocar las piezas.

El primer paso a realizar es insertar un mecanismo ya que es donde se agregarán las juntas y se definirán los comandos.

La primera pieza a insertar será la pieza que se fijará. CATIA V5 sólo permite definir un *Part* como pieza fija. Hay dos maneras de proceder si se tiene más componentes para fijar:

- Todos los componentes tienen que estar creados en la misma *Part*.
- Insertar componente a componente y relacionarlos entre si con una junta rígida.

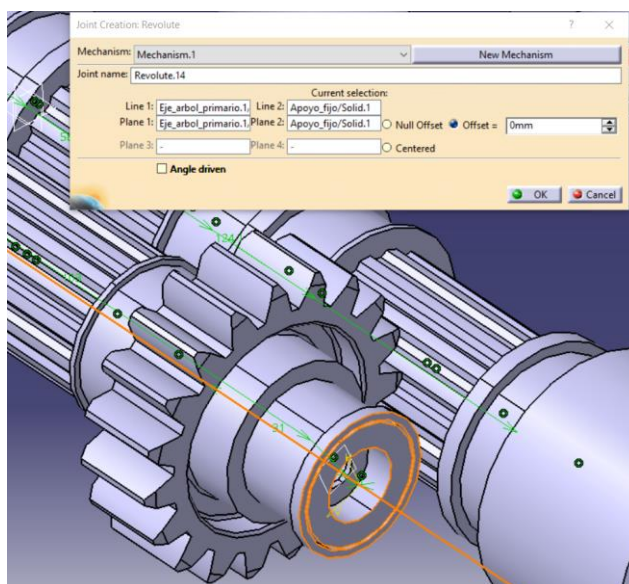
En nuestro caso una sola *Part* ya dispone de todos los apoyos fijos.



**Figura 44.** Disposición y fijación de los elementos fijos del ensamblaje (Fuente: propia)

Para la simulación del sistema de transmisión, como se ha explicado anteriormente, se ensamblará con las herramientas que proporciona el *DMU Kinematics*. Sólo será preciso el uso de cuatro tipos de juntas: *Revolute Joint*, *Prismatic Joint*, *Gear Joint* y *Curve Point Joint*. En el anejo X se explican de forma detallada todas las juntas que contiene el *DMU Kinematics*. Es importante conocer cómo se definen las juntas y el resultado obtenido, ya que es preciso saber cuántos grados de libertad restringe cada unión para poder simular.

Se insertarán los ejes primario y secundario y se unirán a sus respectivos apoyos fijos mediante una *Revolute Joint*.



**Figura 45.** Definición junta de revolución entre eje primario y apoyo fijo



Teniendo los ejes primario y secundario colocados se irán insertando los engranajes empezando desde la marcha 1 hasta la 6. A medida que se vayan insertando los engranajes se irán relacionando entre ellos. Antes de definir las juntas para relacionar los engranajes, *Revolute Joint* y *Gear Joint*, es importante saber que la *Revolute Joint* puede ser definida a partir de dos piezas que no tengan relación directa con la pieza fija del conjunto. Por otra parte, la *Gear Joint* que se define a partir de *dos Revolute Joint* requiere que estas últimas que formen la *Gear Joint* tengan una relación directa de giro (concentricidad) con la pieza fija.

Los engranajes fijos independientes se relacionarán al apoyo fijo correspondiente con una *Revolute Joint*. Los engranajes móviles se relacionarán a su eje mediante una *Prismatic Joint*. Las *Gear Joint* serán definidas a partir de las *Revolute Joint* creadas previamente en los engranajes fijos independientes y las *Revolute Joint* creadas desde la misma operación para los engranajes móviles. A continuación, se explica cómo se ensamblará el conjunto primera marcha y quinta marcha. Los demás ensamblajes de engranajes serán análogos a estos.

Se insertará la pieza *Engranaje\_1(2)*, que hace referencia al engranaje de la marcha 1 en el eje secundario. La pieza *Engranaje\_1(1)* ya viene unida al eje primario formando parte de este, ya que este engranaje lo hemos definido previamente como fijo dependiente. Con el compás se orientará la pieza *Engranaje\_1(2)* para ser ensamblada. Seleccionaremos la operación *Gear Joint*, como se observa en la figura X para definir la *Gear Joint* se puede seleccionar desde el árbol una *Revolute Joint* ya creada o crearla desde la operación *Gear Joint*. Por último, queda definir la ratio de transmisión que se hace, seleccionando los radios de los engranajes. El ratio tiene que ser menor a uno.

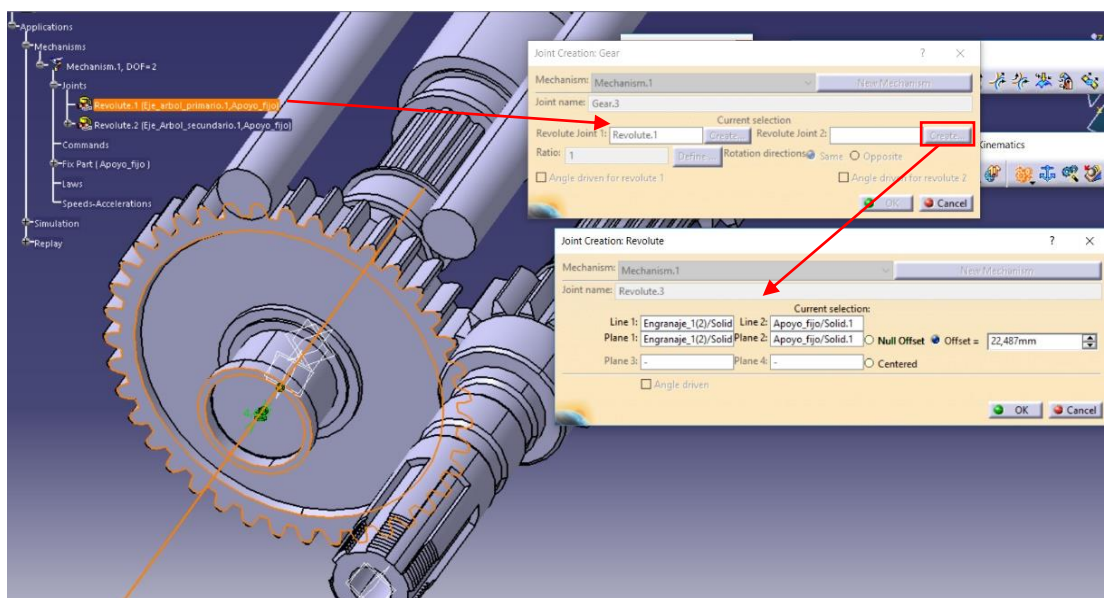
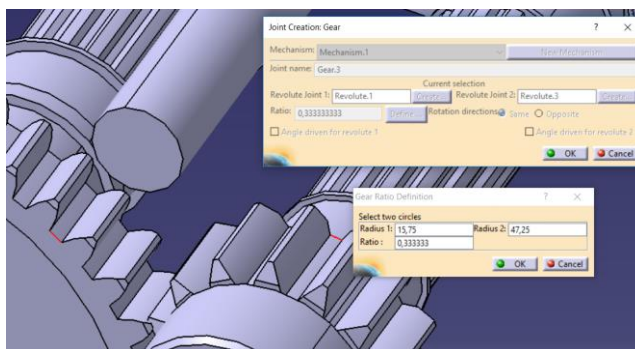
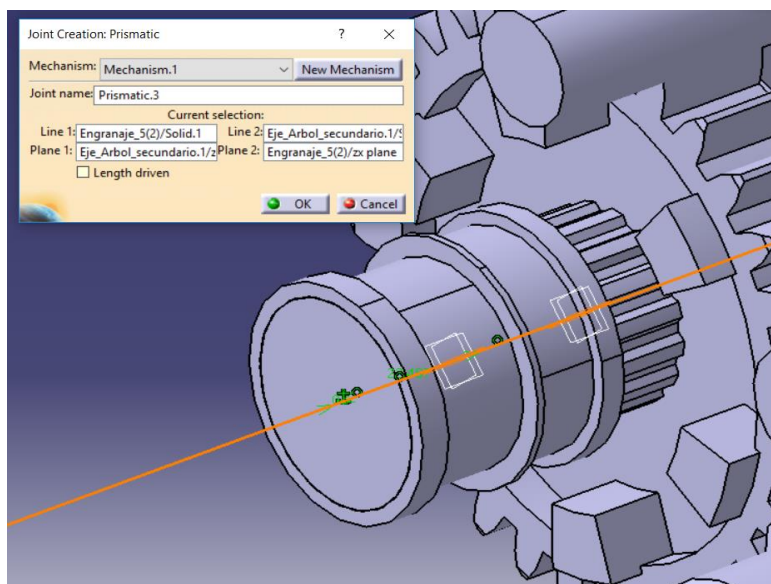


Figura 46. Definición junta de engranaje entre los engranajes que forman la marcha 1 (Fuente: propia)



**Figura 38.** Definición de la relación de transmisión de la junta engranaje primera marcha (Fuente: propia)

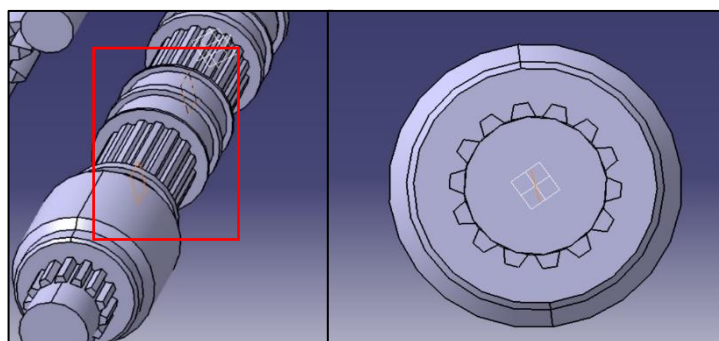
Acabado el procedimiento de ensamblado para el conjunto primera marcha, se insertarán las piezas *Engranaje\_5(1)* y *Engranaje\_5(2)*. El *Engranaje\_5(1)* es un engranaje fijo independiente, se unirá al apoyo fijo mediante *Revolute Joint*. El *Engranaje\_5(2)* es un engranaje móvil por lo que se utilizará la *Prismatic Joint* para unirlo al eje secundario. Por último, queda definir la *Gear Joint* entre ambas piezas seleccionando la *Revolute Joint* del árbol y creando esta última entre el eje secundario y el apoyo fijo. Esta *Revolute Joint* se crea entre el eje y el apoyo ya que hay una unión rígida en la dirección radial entre el *Engranaje\_5(2)* y el eje, es decir, el eje y el engranaje giran coplanarios. De esta manera, el engranaje puede realizar un desplazamiento lineal sobre el eje y a su vez tener una relación de giro con el apoyo fijo.



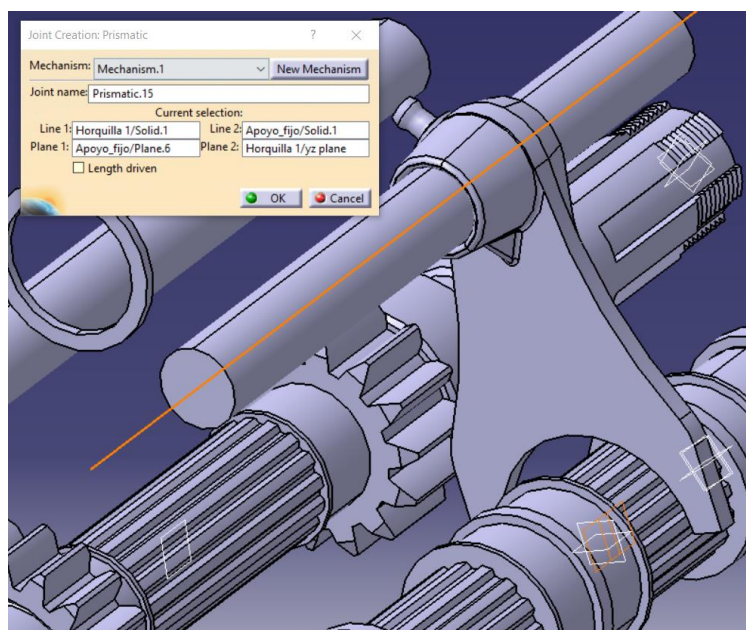
**Figura 47.** Definición junta prismática entre el *Engranaje\_5 (2)* y el *Eje secundario* (Fuente: propia)

El siguiente paso sería acabar de insertar y colocar los demás engranajes mediante las operaciones explicadas anteriormente. Ensamblados los engranajes, se pasa a ensamblar el tambor y las horquillas.

El tambor se relaciona mediante una *Revolute Joint* al apoyo fijo. Por otra parte, las horquillas se ensamblarán a su apoyo fijo mediante una *Prismatic Joint*. Si nos fijamos bien, las horquillas tienen un cierto grado de inclinación, que es el ángulo que hay entre el apoyo fijo de las horquillas y el eje primario o secundario (dependiendo que horquilla sea). Para poder ser ensambladas con este grado de inclinación será preciso crear en el *Part: Apoyo fijo* un plano con esa inclinación para cada horquilla en el eje axial de los ejes primario y secundario. Para más comodidad: ocultar todas las piezas aparte de los ejes y del apoyo fijo. Cuando se defina la *Prismatic Joint*, como líneas coincidentes se seleccionarán: el eje axial de su apoyo fijo y el eje axial del cabezal de la horquilla; y como planos coincidentes se elegirá el plano medio de la horquilla y el plano inclinado creado anteriormente.



**Figura 48.** Inserción de planos para la inclinación de las horquillas (Fuente: propia)

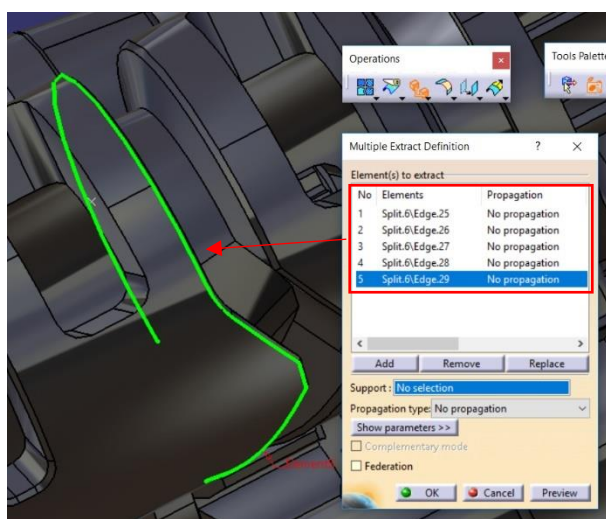


**Figura 49.** Definición de junta prismática para el movimiento de las horquillas (Fuente: propia)

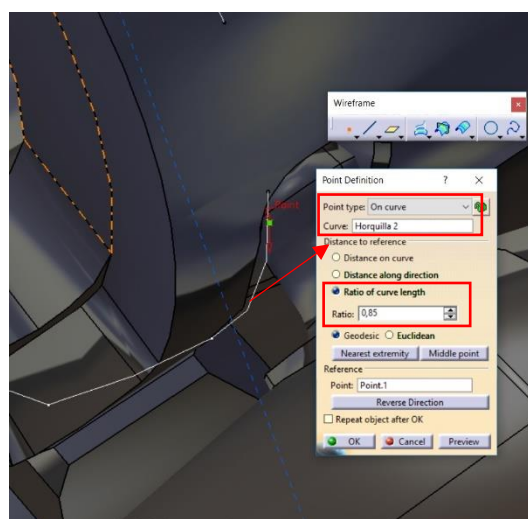
Para el ensamble de las demás horquillas con el apoyo fijo se seguirá el mismo procedimiento.

Llegado a este punto, se diseñará el cuerpo base del tambor, explicado detalladamente en el apartado 3.2.2. *Diseño a partir de un entorno previamente definido*). Diseñado el cuerpo base del tambor se procederá a realizar una simulación previa, tal y como se tiene el conjunto ensamblado hasta ahora, mediante la utilización de una ley gráfica manual explicada en el apartado 4.2.1.3. *Definición por ley gráfica*.

Diseñado el tambor completo se puede proceder con la definición total del mecanismo. El tambor transmite el movimiento a la horquilla por efecto leva, pero en el *DMU Kinematics* no existe esta relación de transmisión. Para poder simular este movimiento se requerirá utilizar la junta *Point Curve*. La curva guía será extraída de las guías del tambor utilizando la herramienta *Multiple extract*, esta herramienta se encuentra en el módulo GSD. Por otra parte, será preciso crear un punto desde la *Part* horquilla y que este, a su vez, pertenezca a la curva. Se utilizará la herramienta *Point*, también perteneciente al módulo GSD.



**Figura 50.** Creación de curva (Fuente: propia)

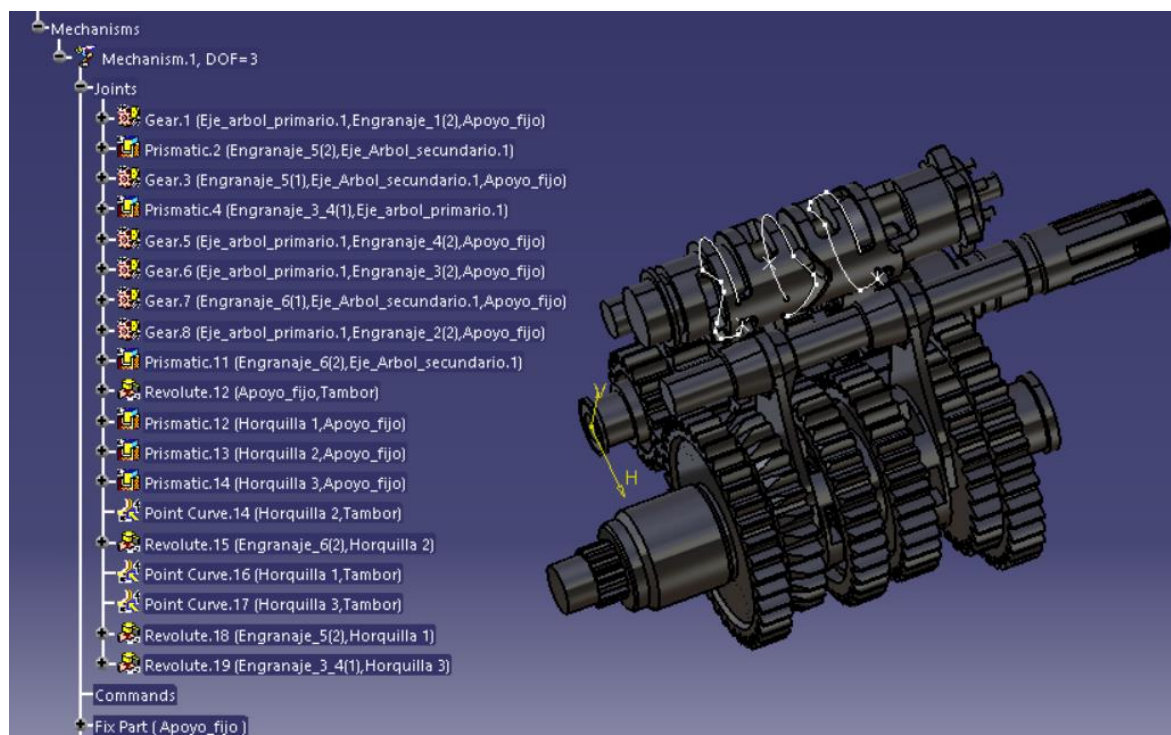


**Figura 51.** Creación de punto en curva (Fuente: propia)

Creada la curva y puntos en sus respectivos *Parts* definir la junta *Joint Curve*. Se realizará este procedimiento para las demás horquillas. Por último, queda relacionar los engranajes móviles a las horquillas, se utilizará la junta *Revolute Joint*.

Con la ayuda del compás se colocarán los engranajes móviles, horquillas y tambor en la posición inicial (posición de primera marcha). Llegados a este punto obtendremos el siguiente resultado.





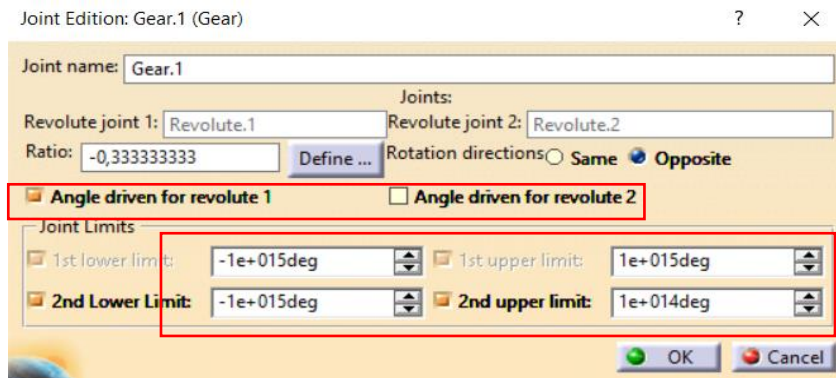
**Figura 52.** Todas las juntas definidas para la simulación (Fuente: propia)

Llegado a este punto se obtienen todas las relaciones de posición definidas para la simulación y se encuentra una limitación del *DMU Kinematics*. El mecanismo aún no puede ser simulado ya que detecta 3 grados de libertad. Como se explica en la introducción a la simulación, se requerirá de la activación de comandos para reducir estos grados y poderle transmitir movimiento al mecanismo.

Sólo existen dos tipos de comandos:

- Comando que controla la longitud: *Lenght driven*
- Comando que controla el ángulo de giro: *Angle driven*

Los comandos se activan dentro de las operaciones de creación de juntas (siempre y cuando se permita).



**Figura 53.** Activación de comandos en juntas (Fuente: propia)

El rango que aparece al activar el comando es el rango de movimiento que tendrá la pieza. En la simulación directa este rango cobrará importancia (en este estudio no se utilizará la simulación directa, ésta viene explicada en el anejo X). Por otra parte, en la simulación por leyes no se tendrá en cuenta, ya que el rango, como veremos más adelante, vendrá definido por una ley gráfica. A diferencia de los inputs, en los outputs de la simulación sí que tendrá relevancia tanto en la simulación por leyes como en la directa, ya que los valores que darán los sensores estarán acotados por estos rangos. Por este motivo, como nuestro estudio de simulación se comandará mediante leyes se impondrá un rango desproporcionado para no tener problemas cuando obtengamos la gráfica de los resultados.

Al activarse los comandos aparecerán dentro del mecanismo en el subapartado *comandos*. Se activarán los comandos de la *Revolute Joint* del tambor y de la *Gear Joint* del conjunto marcha 1. Estos dos comandos hacen referencia a los inputs de entrada, desplazamiento del tambor y velocidad angular de entrada. Para definir el entorno del motor, adicionalmente a la activación de estos dos comandos, se activarán los comandos de las tres *Prismatic Joint* de las horquillas, ya que, no existirá la junta *Point Curve* y se deberá simular el movimiento de las horquillas mediante estos comandos de desplazamiento lineal.

Con todo esto, aun así, quedará un grado de libertad sin restringir. Este grado de libertad corresponde al giro del eje secundario respecto su apoyo fijo. En este punto se observa una limitación del *DMU Kinematics*, debido a que la transmisión de movimiento entre los engranajes fijos independientes y los móviles es imposible de simular con las relaciones cinemáticas. Esta relación de transmisión restringiría el último grado de libertad, pero debería ser una relación dinámica de contacto. Esto se traduce a que, con los dos inputs reales de entrada y las relaciones de posición, no se consigue simular el movimiento entero del cambio de marchas y extraer la velocidad de salida de forma directa. Para rebajar los grados de libertad y poder simular el mecanismo se activará el comando de la *Revolute Joint* del apoyo fijo con el eje secundario, que simulará la velocidad angular de salida (que tendrá que ser calculada aparte). Técnicamente, en nuestro estudio sólo se podrían obtener resultados cinemáticos de las 4 primeras

marchas y de las horquillas. Para obtener el resultado experimental de la marcha 5 y 6 se debería de definir mecanismos aparte (específicos para esos conjuntos).

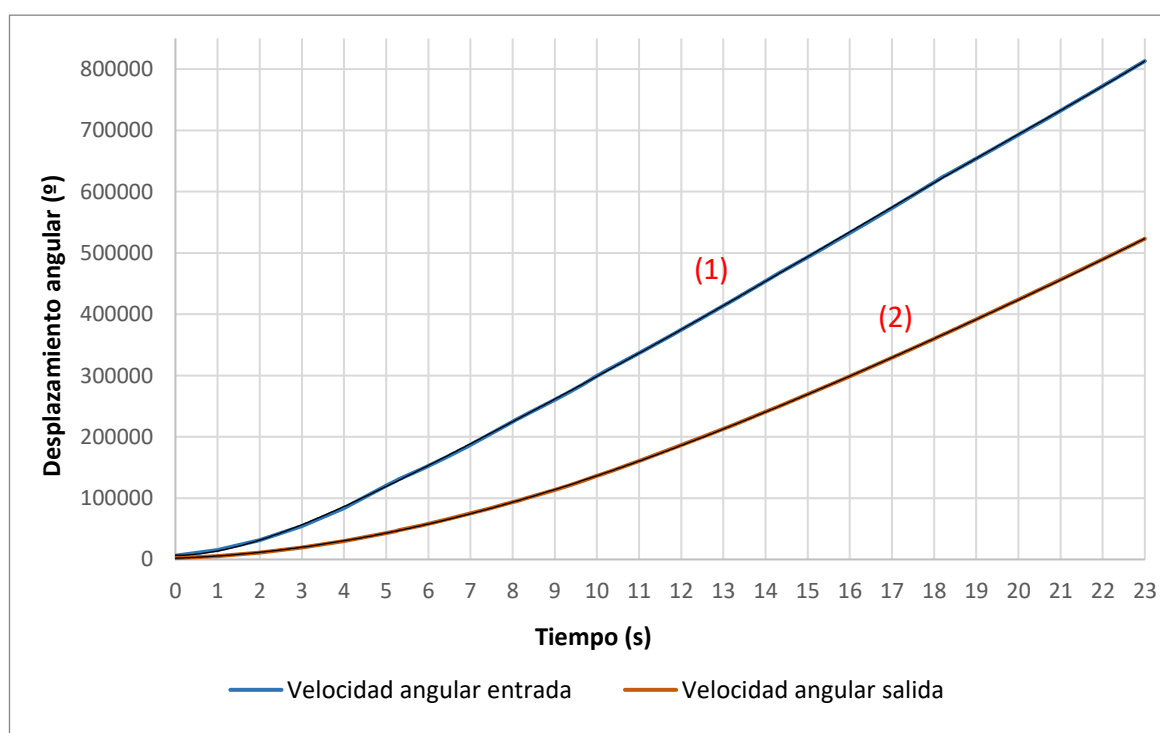
#### 4.2.1.2. Definición de comandos mediante leyes

Los comandos se definirán mediante leyes gráficas o por ley explícita (expresión matemática).

En este estudio se tienen inputs de velocidad angular, esta magnitud directamente no se puede definir en los comandos ya que sólo existen dos tipos: los que controlan la magnitud longitud lineal y los que controlan la magnitud ángulo de giro. Por este motivo, se debe hacer un paso previo y cambiar los valores de velocidad angular en función del tiempo a desplazamiento angular en función del tiempo. En el Anejo X se explica este proceso y los resultados obtenidos. En la Gráfica X se muestra el resultado, donde se observará la función a dibujar y la expresión matemática que define la función.

$$y = 0,024x^6 - 1,8554x^5 + 56,449x^4 - 873,7x^3 + 7590,3x^2 + 372,92x + 6674,5 \quad (1) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

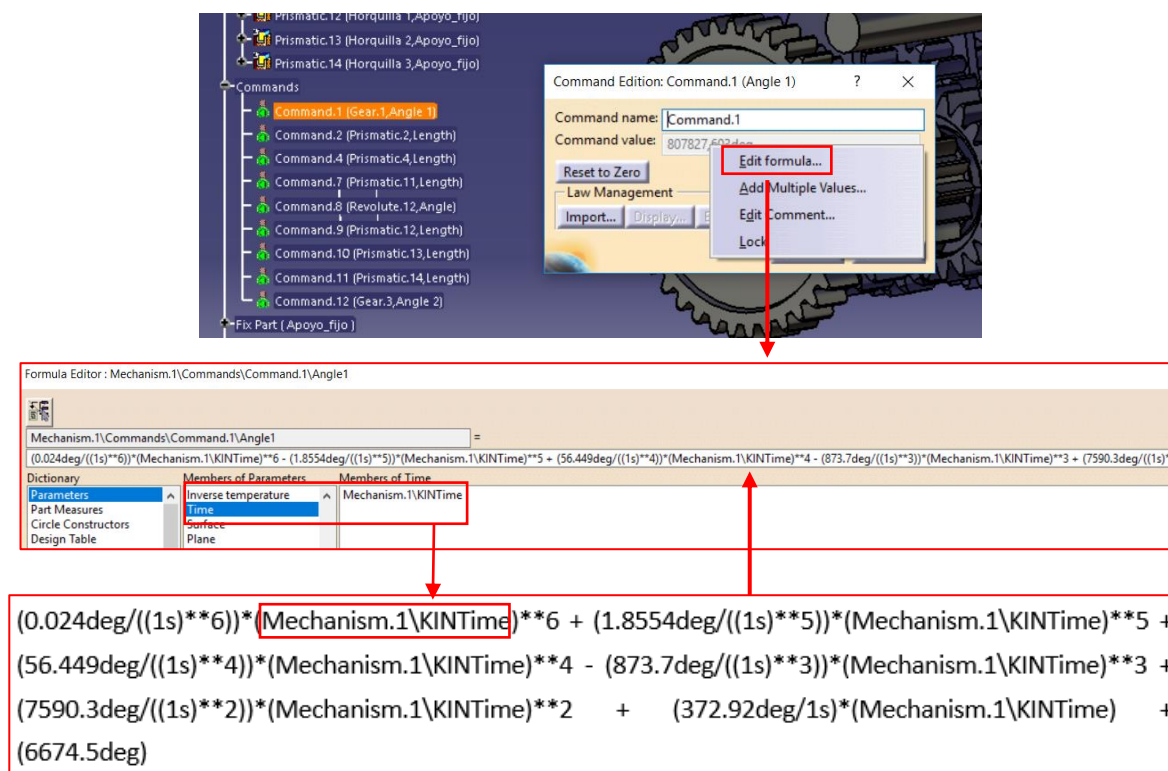
$$y = 0,0016x^6 - 0,0621x^5 + 0,2445x^4 - 3,399x^3 + 1143x^2 + 2585,7x + 1948,4 \quad (2) \quad (\text{Ec. 4.2})$$



**Gráfica 3.** Desplazamiento angular de entrada y salida en la transmisión (Fuente: propia)

##### 4.2.1.2.1 Definición por Ley explícita

Se definirá por expresión matemática sólo el desplazamiento angular de entrada para poder observar cómo se define de cara a la comparación. Se agregará la expresión matemática (Ec. 4.1) cambiando el valor de las abscisas (X) por el parámetro *Time: Mechanism.1/KinTime* (que corresponde al tiempo de la simulación). A este parámetro se le otorgará el valor de durada de la simulación, en nuestro caso 23 s.



**Figura 54.** Definición de expresión matemática para un comando en *DMU Kinematics* (Fuente: propia)

Es muy importante definir bien las unidades en la expresión para obtener en el resultado las unidades correctas. En el caso de desplazamiento angular serán grados ( $^{\circ}$ ) y en el caso de desplazamiento lineal mm.

#### 4.2.1.3. Definición por ley gráfica

Como bien recalca su nombre, la ley gráfica tiene que ser dibujada en el *Sketch* de una *Part*. Se creará una *Part* que se llamará *Leyes*, donde se dibujará (en *Sketches* separados) la función de movimiento referente a cada input. Las leyes se pueden dibujar a partir de:

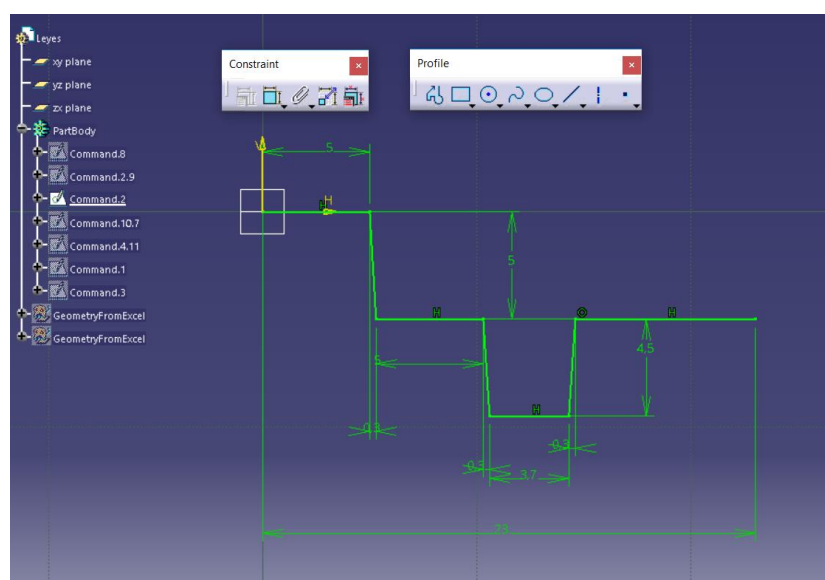
- Forma manual
- Macro Excel cedida por *Dassault Systèmes* (definición por puntos)
- Expresión matemática



Se definirá la ley para el desplazamiento del eje primario de estas tres formas para poder observar los diferentes métodos. Los demás comandos serán definidos utilizando los puntos de datos.

- Función de movimiento dibujada de forma Manual.

Esta definición se basa en la utilización de las herramientas *profile* para la creación de una ley. Dibujar de forma manual la función que defina el movimiento de la pieza a simular. Como se tiene que dibujar de forma manual este procedimiento, se hará a partir de pocos puntos de datos o que no sea el caso de una función de movimiento compleja. Por ejemplo, es el caso de la función que define el movimiento de los engranajes móviles y horquillas. En el caso de dibujar las funciones de desplazamiento del eje primario o secundario manualmente, sería una operación tediosa de realizar que conllevaría un gasto de tiempo desproporcionado para el resultado a obtener. En conclusión, para el apartado 3.2.2. Diseño a partir de un entorno previamente definido las horquillas el movimiento de antes de relacionar las horquillas con relaciones cinemáticas al tambor se simulará de esta forma para obtener las curvas guías en el tambor.



**Figura 55.** Ley gráfica *command* 2 definida de forma manual (Fuente: propia)

DMU Kinematics leerá el eje horizontal (H) como tiempo y el eje vertical (V) como distancia lineal (mm) o angular ( $^{\circ}$ ) dependiendo del comando creado. En el caso de la figura X, hemos definido que 23 mm equivaldrán a 23s.

- Definición por *Macro Excel* cedida por *Dassault Systèmes*

El software CATIA V5 de forma nativa no permite definir los comandos a partir de puntos de datos (si no se definen los puntos de forma manual). Por el contrario, CATIA V5 sólo permite definir los

comandos por desplazamiento angular o lineal, que en la mayoría de las simulaciones complejas, se traduce en una cantidad de puntos de datos alta. En nuestro caso se obtienen 54 puntos que definen el movimiento para el eje primario. Para solucionar este problema se tienen programas externos que permiten la definición de un comando a partir de puntos de datos. En nuestro caso, se utiliza una Macro Excel cedida por *Dassault Systèmes*.

Se abrirá el Excel que contiene la Macro y conjuntamente la *Part Leyes*.

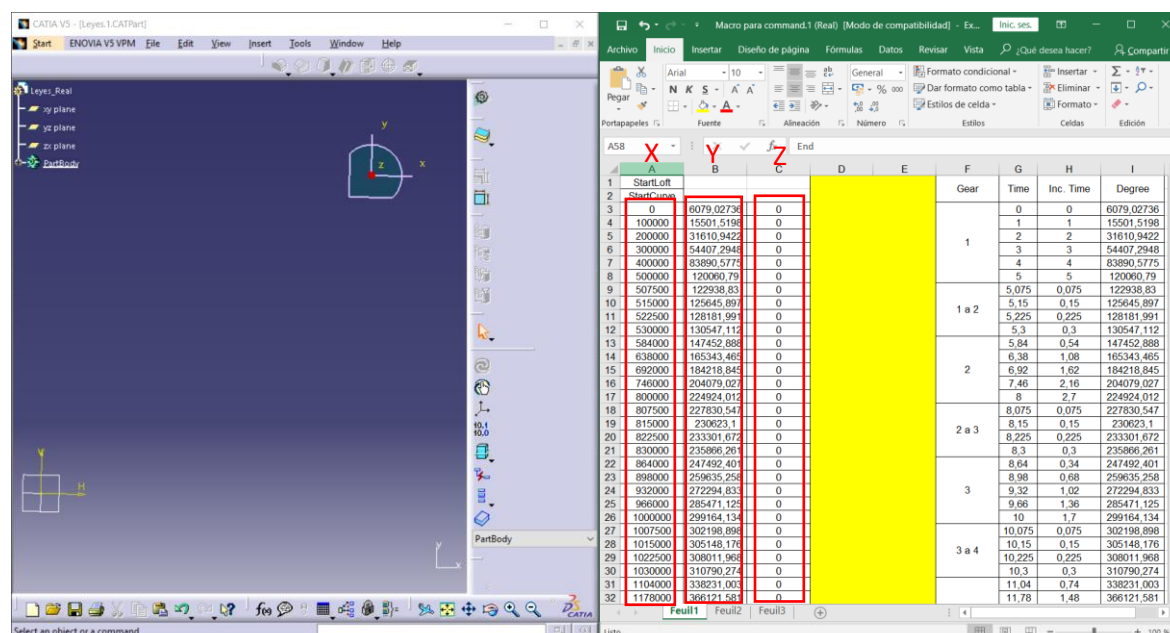


Figura 56. Preparación para la ejecución de la Macro (Fuente: propia)

En las tres columnas de la izquierda (donde cada columna representa un eje de coordenadas), se introducirán los datos. En este caso como estamos tratando con desplazamientos que llegan al orden de  $10^5$  grados ( $^\circ$ ) para que quede dibujada una función proporcionada se establecerá que 10.000 mm equivalen a 1s de simulación. Por este motivo, cuando se introduzcan los parámetros en la Macro, la magnitud tiempo será multiplicada por 10000.

Se ejecuta la Macro y se elige, que aparte de representar los puntos en la *Part*, cree una *spline* entre estos puntos.

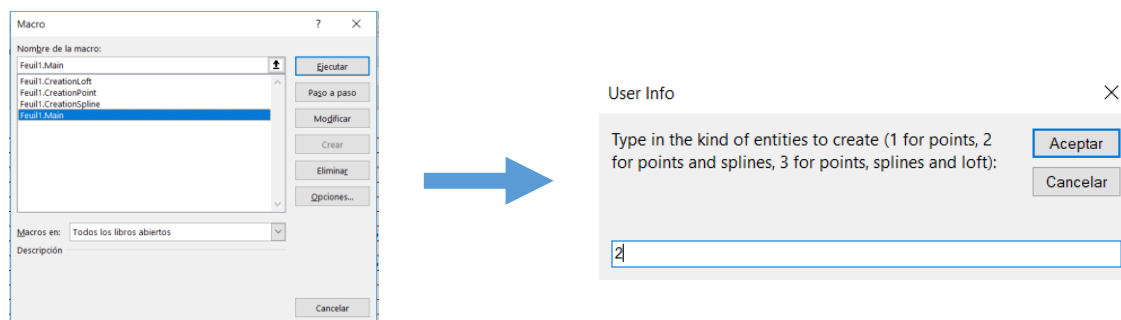


Figura 57. Ejecución de la Macro (Fuente: propia)

El resultado final se observa a continuación en la figura X.

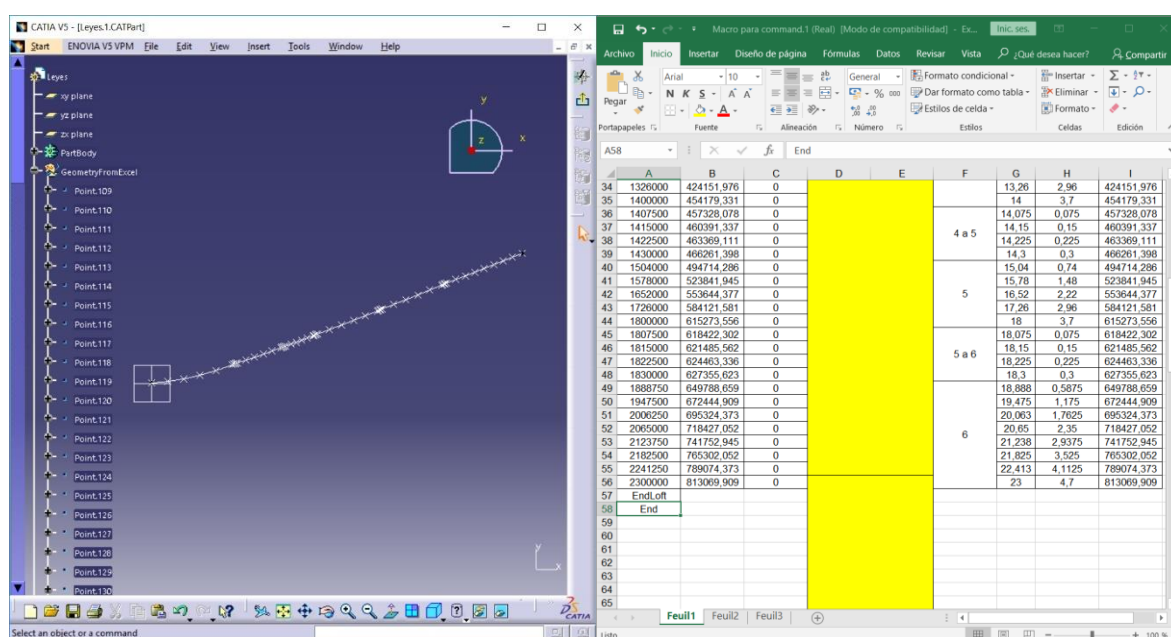
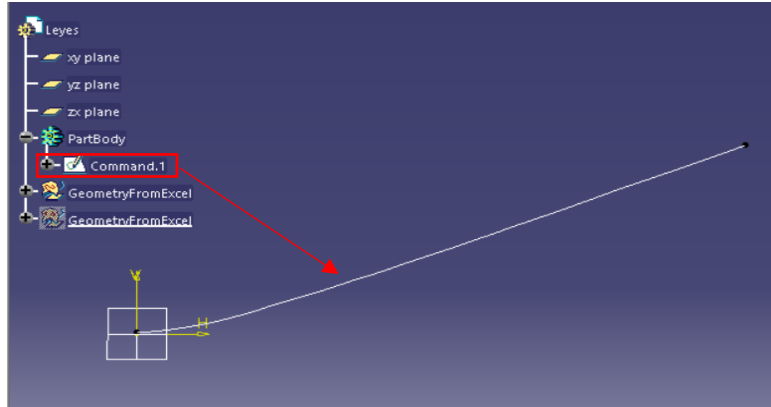


Figura 58. Resultado de la Macro (Fuente: propia)

El cambio en la proporción de la función no es sólo para que la representación de esta tenga una apariencia estética mejor, sino para impedir errores en la creación de la *spline*. En el anexo x se muestra un ejemplo de error en la creación de la *spline* y la función representada, sin hacer el cambio de proporción en los segundos.

Los elementos que crea la macro no se encuentran en un *sketch* y para definir una ley la función tiene que estar dibujada en un *sketch*. En *PartBody* se creará un *sketch* en el plano donde se ha definido la *spline* con la macro y con la herramienta *Project 3D Elements* se proyectará la *spline* al *sketch*. Ya se tendrá definida la ley.



**Figura 59.** Ley gráfica *command 1* (Fuente: propia)

- Ley gráfica definida por expresión matemática

Este es el caso en el que un movimiento es regido mediante una expresión matemática y se quiere su representación gráfica. Para representar una expresión matemática en una *CATPart* se utilizará la herramienta *Law*.

La función a definir (Ec. 4.1) al igual que en la macro, se tomará que 10000 mm equivalen a 1s de simulación. Esta escala es necesaria, ya no sólo para que la función se dibuje proporcionada, sino para que la herramienta *Parallel Curve* (con la que se va a dibujar la función) se ejecute correctamente.

$$y = 2E-32x^6 - 2E-25x^5 + 6E-19x^4 - 9E-13x^3 + 8E-07x^2 + 0,0037x + 6674,5 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

El tiempo de simulación de 23s en la representación gráfica equivaldrá a 2.300.000 mm, este valor se tendrá en cuenta para la definición de la expresión matemática.

En *Law* se escribirá la expresión matemática (Figura X), pero multiplicando la variable *X* por 2.300.000. Este paso es necesario ya que la herramienta que nos dibuja la expresión matemática *Parallel Curve*, define el rango de la variable que va a ir en el eje de abscisas entre 0 a 1. Será necesario multiplicar la variable que va a ir en las abscisas, "*x*", por el rango real que se va a tener en nuestro caso que es 2.300.000mm.

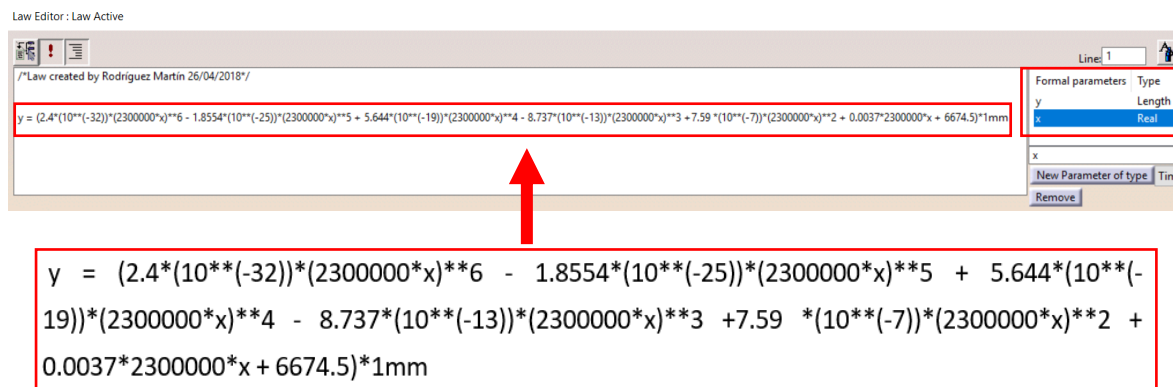
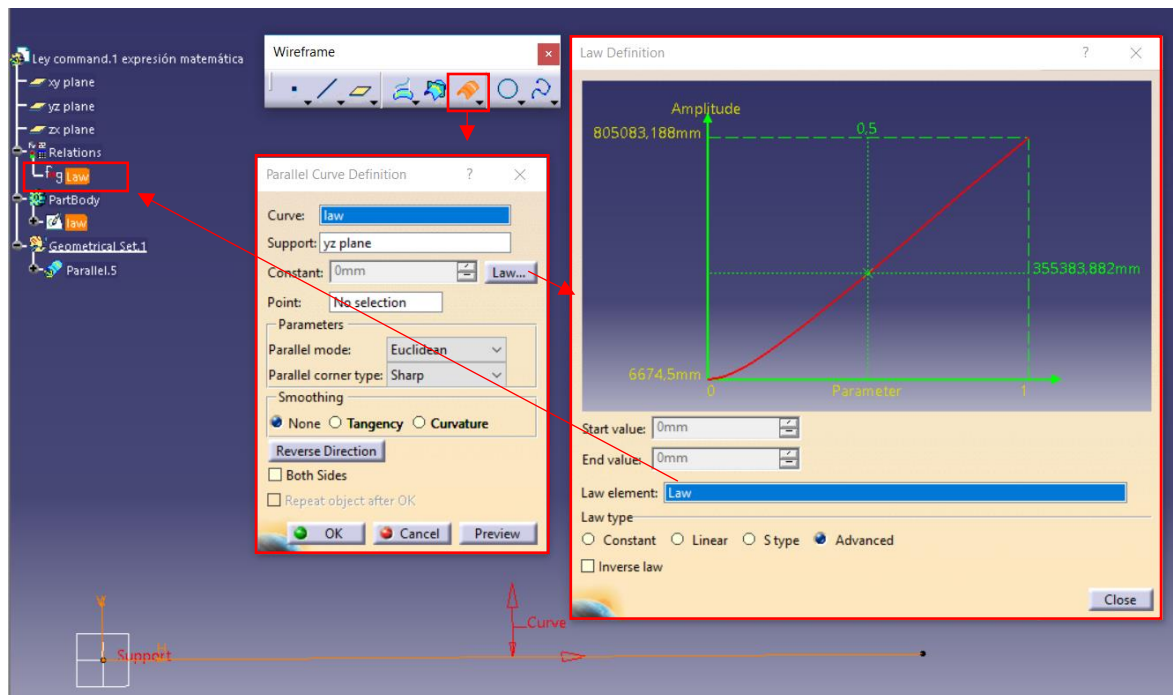


Figura 60. Definición expresión matemática en Law (Fuente: propia)

También para que la herramienta *Parallel Curve* dibuje correctamente la expresión, la variable “x” se definirá de tipo *real* y la variable “y” de tipo *length*. Por último, se multiplicará toda la expresión por 1mm ya que la “y” es de tipo *length*.

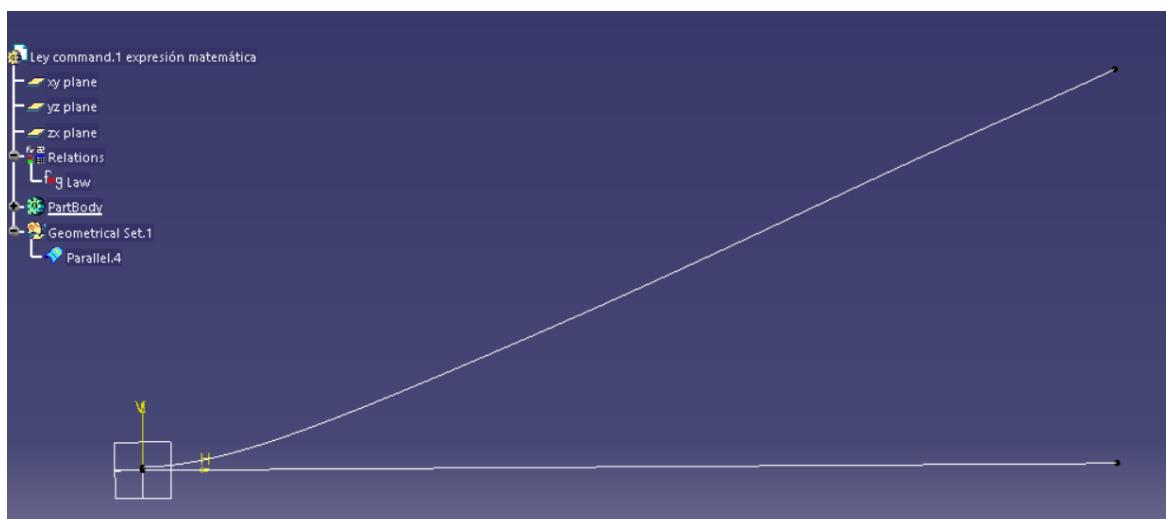
Para ejecutar la herramienta *Parallel Curve* en un *sketch* hay que dibujar una recta de distancia 2.300.000 que representan los 23s que dura la simulación.

Una vez se ha dibujado la línea en un *sketch* se abre la herramienta *Parallel Curve*, se selecciona la línea creada y el plano que contiene esa línea. Posteriormente, se presiona en *law* y se selecciona desde el árbol la expresión matemática que se había definido anteriormente.



**Figura 61.** Ejecución de la herramienta *Parallel Curve* (Fuente: propia)

Al igual que en la macro, la *spline* que dibujada tiene que estar representada en un *sketch* por lo que se seguirá el procedimiento anterior para proyectar la *spline* a un *sketch*.

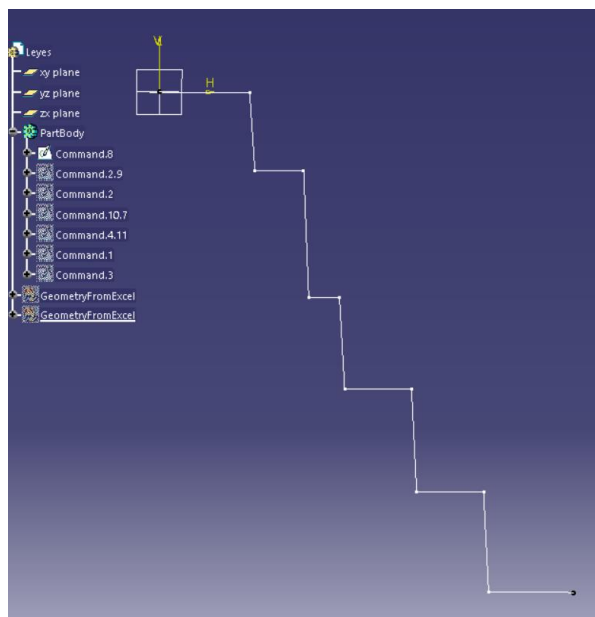


**Figura 62.** Expresión matemática dibujada en la interfaz gráfica (Fuente: propia)

Los restantes comandos quedan definidos de la siguiente manera:



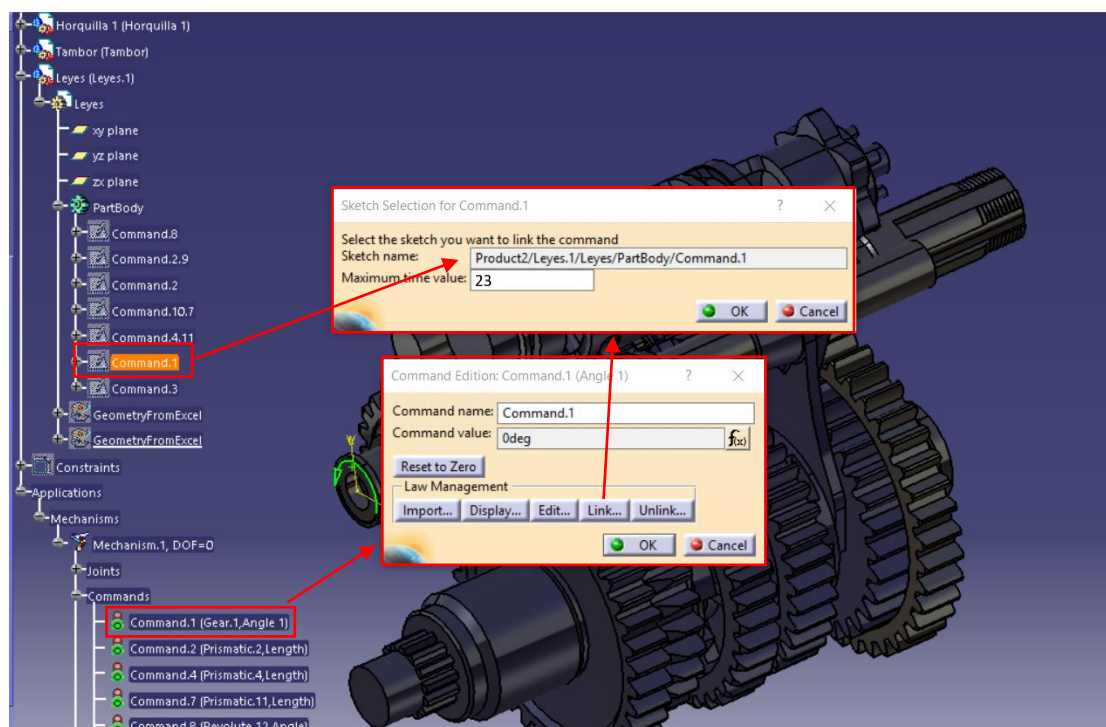
**Figura 63.** Ley gráfica del desplazamiento angular de salida (Fuente: propia)



**Figura 64.** Ley gráfica del desplazamiento angular del tambor (Fuente: propia)

Por último, se tienen que relacionar los sketches que contienen las funciones gráficas con los comandos.

El *Part Leyes* se insertará en el *Product Simulación*.



**Figura 65.** Vinculación de una ley gráfica con un comando (Fuente: propia)

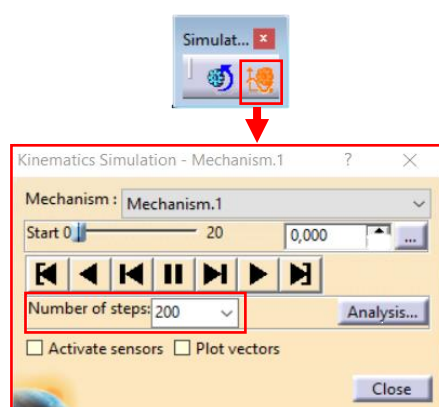
Tal y como se muestra en la [figura XX](#), para relacionar las leyes a los comandos se selecciona el comando y se presiona en *link*. Se establecerá 23 segundos de simulación y se elegirá el *sketch* que contenga dibujada la función matemática correspondiente.

Procediendo de esta manera se relacionarán todas las funciones a los comandos.

El mecanismo está preparado para ser simulado.

#### 4.2.2. Ejecución de la simulación

En CATIA V5 como se ha comentado anteriormente sólo se podrá hacer simulación cinemática. Una vez se ha definido todos los parámetros del mecanismo para ejecutar la simulación se tendrán que preparar los parámetros para esta.



**Figura 66.** Simulación por ley (Fuente: propia)

Para la simulación en CATIA V5 el único parámetro a definir en la simulación son las tramas. Cuantas más tramas se tenga más datos de la simulación se podrán extraer. En este estudio simularemos a 200, 500 y 1000 tramas.

#### 4.2.3. Resultados

En los resultados se comentará el funcionamiento de ambos programas a la hora de simular y se mostrarán los resultados analíticos y de animación que se han obtenido a partir de las respectivas simulaciones.

Los resultados más destacables que se obtienen a partir de la simulación es la obtención de magnitudes cinemáticas, trazas de recorrido y envolventes de volumen. Se mostrarán los resultados obtenidos y como se han obtenido.



#### 4.2.3.1. Magnitudes cinemáticas

Se pueden extraer tanto gráficas como resultados en formato Excel. Sólo se podrán extraer datos de desplazamiento angular o lineal de las *Joints* que se activen en la recogida de datos durante la simulación.

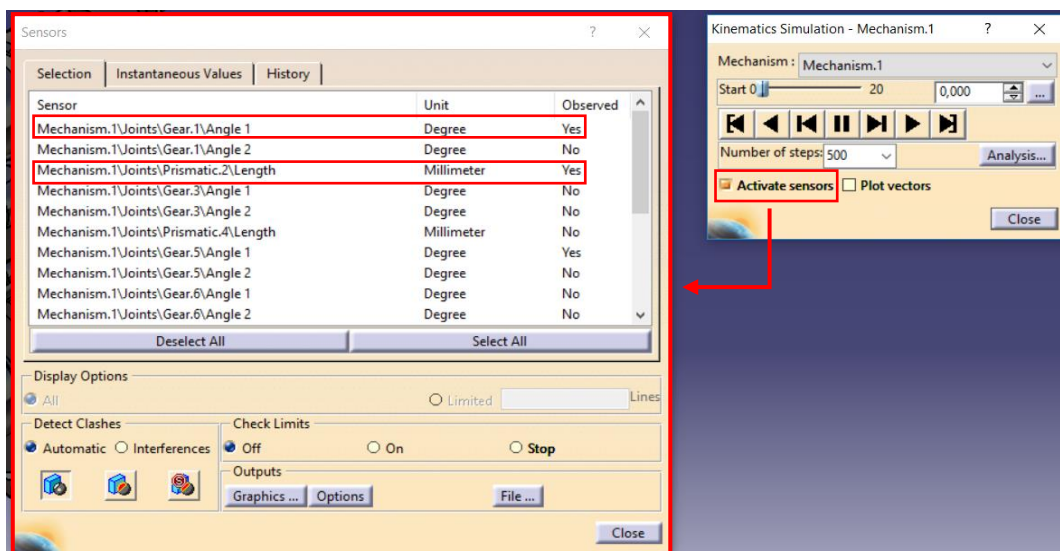


Figura 67. Activación de sensores (Fuente: propia)

Los resultados podrán estar en función del tiempo o en función de magnitudes cinemáticas del sistema.

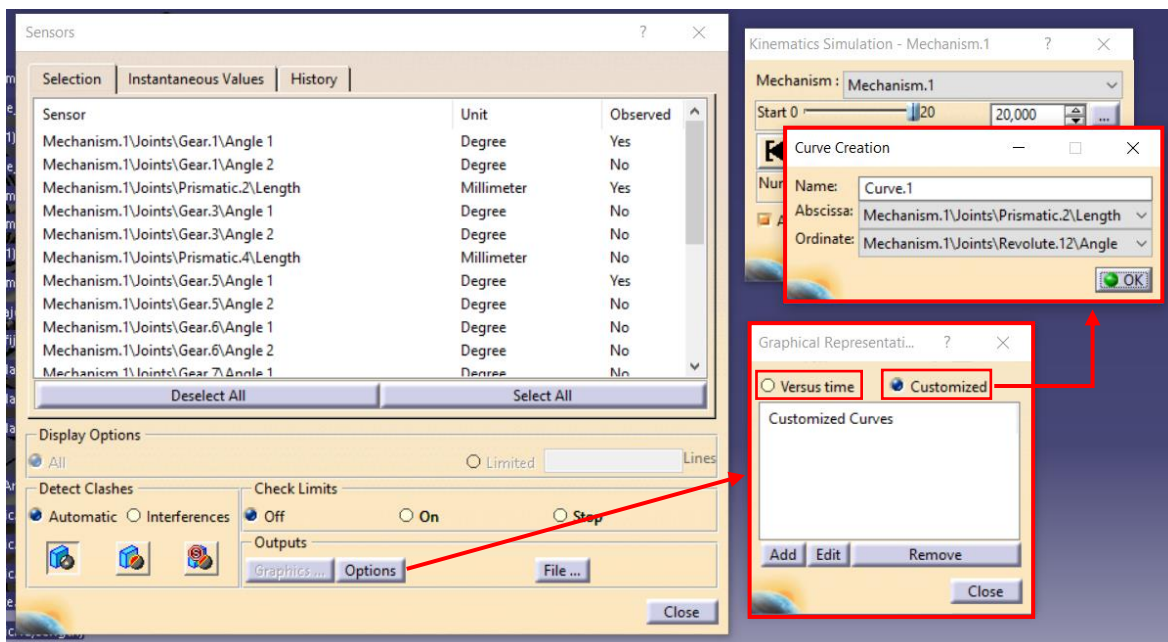
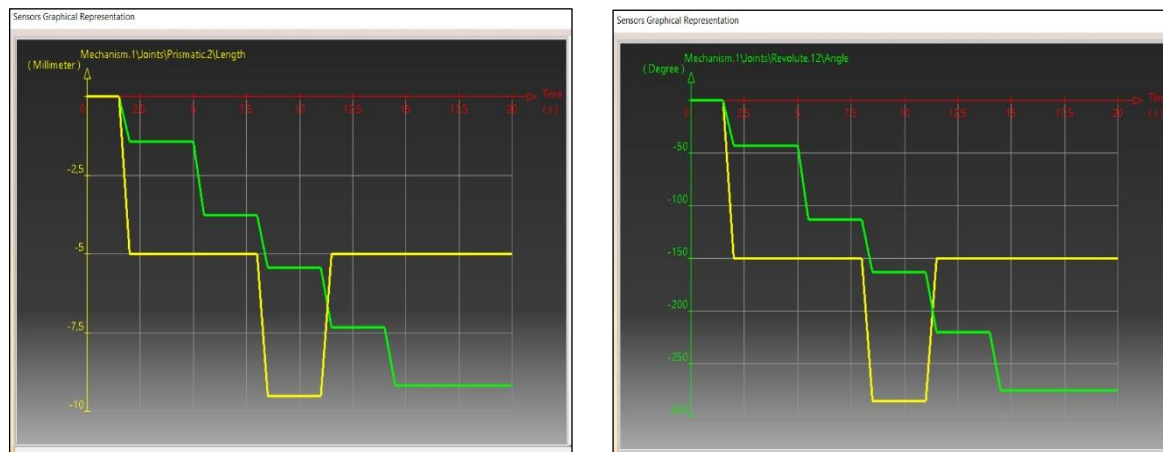
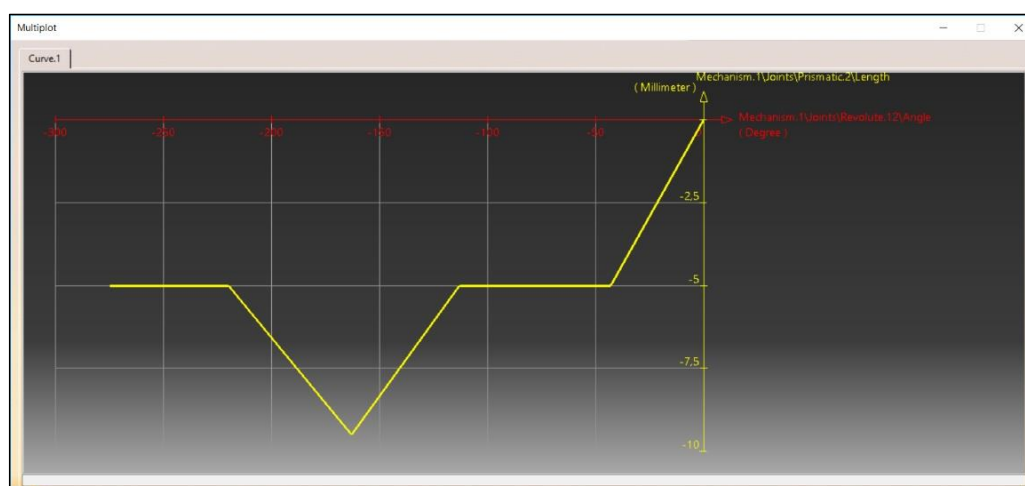


Figura 68. Extracción resultados sensores en gráfica (Fuente: propia)

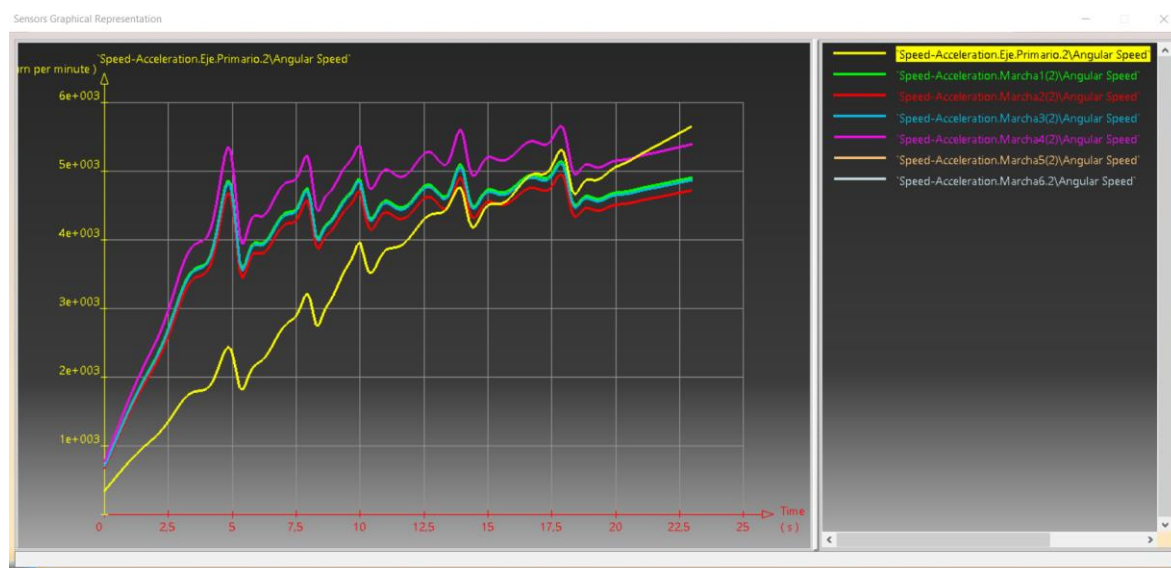
A continuación, se mostrará el desplazamiento angular del tambor y el desplazamiento lineal de la *horquilla 1* en función del tiempo (Figura 69) y, por otra parte, el desplazamiento lineal de la horquilla en función del desplazamiento angular del tambor (Figura x).



**Figura 69.** Gráfico desplazamiento lineal de la *horquilla 1* (izquierda) y gráfico desplazamiento angular del tambor (derecha) en CATIA V5(Fuente: propia)

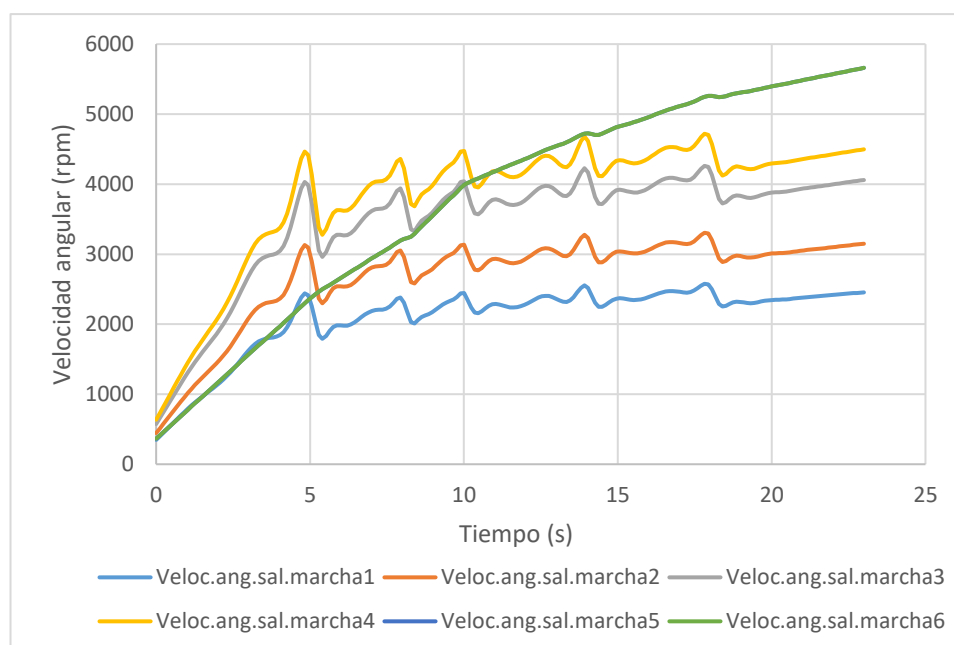


**Figura 70.** Gráfico combinado de: desplazamiento lineal de *horquilla 1* y de desplazamiento angular del tambor en CATIA V5(Fuente: propia)



**Figura 71.** Gráfico de todas las velocidades angulares de los engranajes que forman el *Eje secundario* y velocidad angular del *Eje secundario* en CATIA V5(Fuente: propia)

En la figura 71 se observan los resultados de los sensores graficados por CATIA V5. En esta, se aprecia que cada resultado tiene su propia escala de visualización, este hecho conlleva a que no podemos observar todos los resultados en un mismo gráfico ya que no comparten la misma escala de visualización. En cambio, en la gráfica 4, obtenida a partir de importar los resultados obtenidos en Excel, obtenemos la escala de visualización real.



**Gráfica 4.** Todas las velocidades angulares de los engranajes que forman el *Eje secundario* y velocidad angular del *Eje secundario* en Excel (Fuente: propia)

#### 4.2.3.2. Trazas de recorrido

El trazo de recorrido es una función muy útil para poder rediseñar piezas en función del movimiento que tendrán en el conjunto. En CATIA V5 las trazas de recorrido se forman a partir de puntos y una *spline* que los interseca. La cantidad de puntos vendrá definida por la cantidad de *steps* a la que se simule.

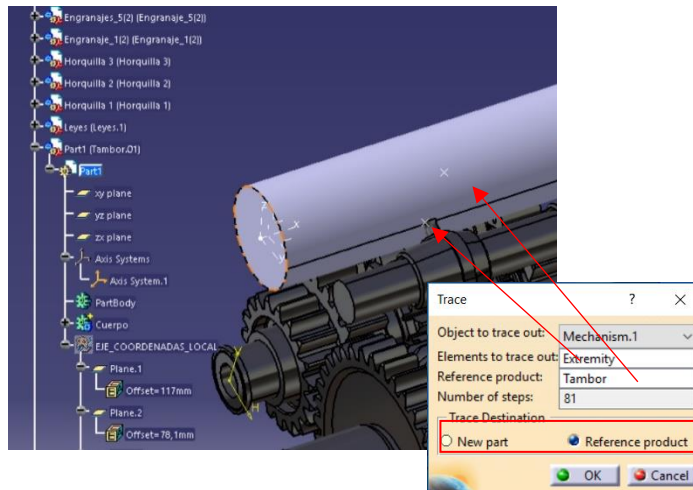


Figura 72. Extracción de ruta de trazo de las horquillas (Fuente: propia)

El trazo será generado en un *geometrical set* dentro de la pieza referenciada. Cuanto más *steps* se utilicen en la simulación más preciso será el trazo, ya que la *spline* será más precisa a mayor cantidad de puntos. Cabe decir que el tiempo de realización del trazo incrementará a mayor cantidad de *steps*. A continuación, se mostrará la trazada de cada horquilla cogiendo como referencia el tambor. Para observar la precisión y el tiempo de carga de la simulación, para la *horquilla 1* la simulación será de 81 *steps*(1), para la *horquilla 3* será de 200 *steps*(2) y para la *horquilla 2* será de 500 *steps*(3).

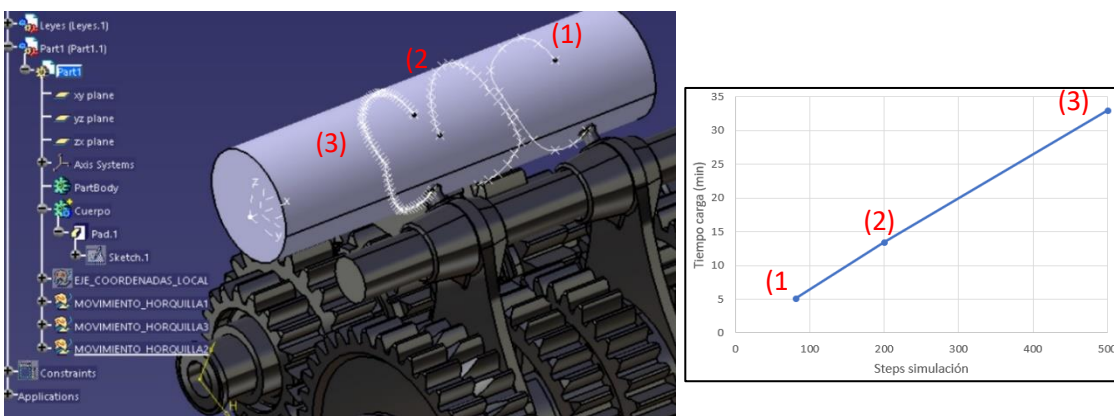


Figura 73. Ruta de trazo de las horquillas (Fuente: propia)



#### 4.2.3.3. Envoltentes de volumen

Crea un archivo CGR con el recorrido del volumen de una pieza. Este resultado permite visualizar el alcance de volumen que va a ocupar la pieza a lo largo de la simulación dentro de su conjunto.

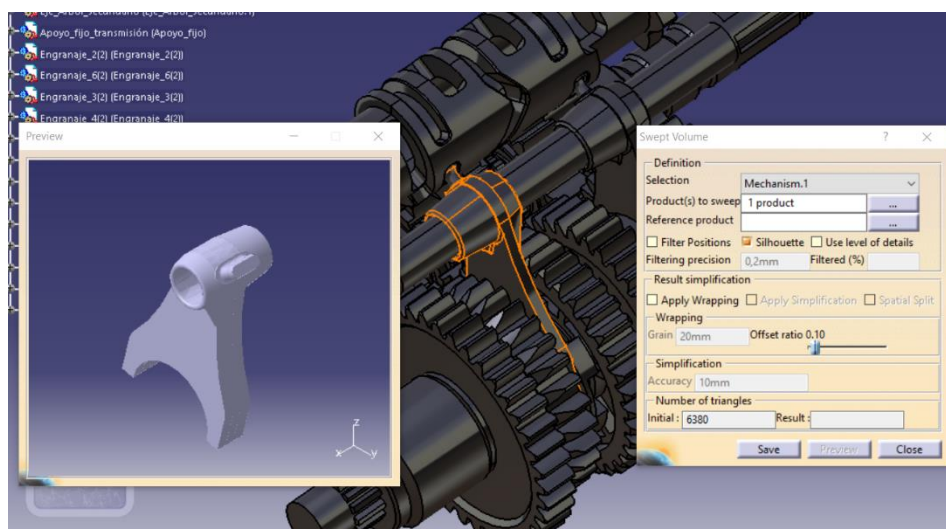


Figura 74. Creación de un archivo CGR (Fuente: propia)

La envoltente de volumen se guardará en formato CGR y para visualizarla en el conjunto simulado se insertará posteriormente en el *Product* del conjunto. Los tiempos de carga para la creación de estas envoltentes son extensos. También cuando sean insertados y cargados en el conjunto simulado harán que la interfaz gráfica se vea sobrecargada, ralentizando el movimiento dentro de la interfaz. A continuación, se mostrará una envoltente para la *horquilla 1* y otra para el *Engranaje\_3y4(2)*.

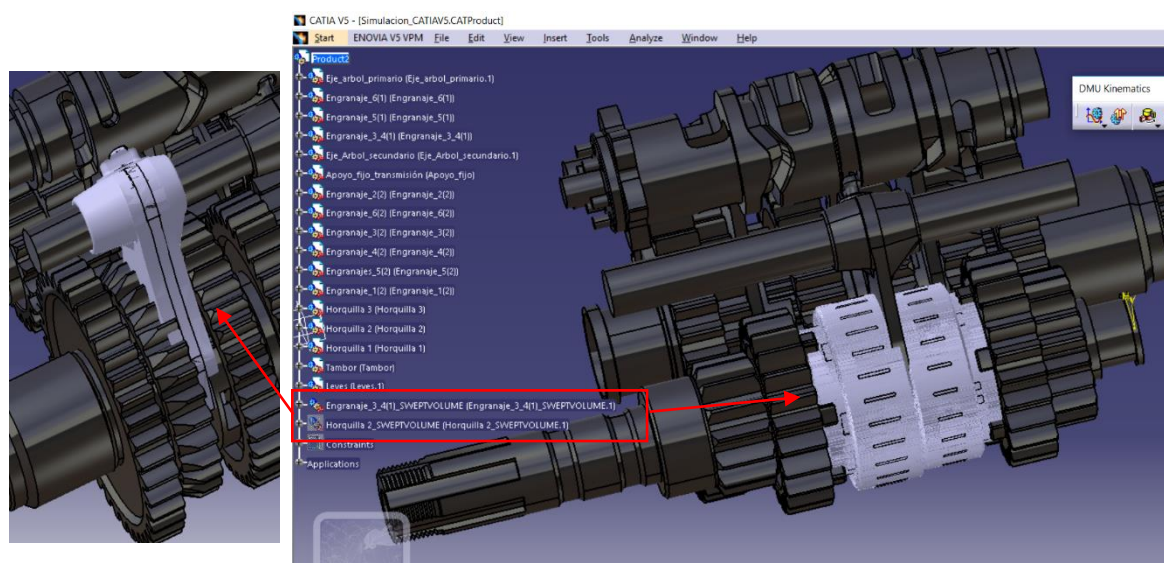


Figura 75. Archivo CGR cargado en el *Product* (Fuente: propia)

### 4.3. Simulación con SolidWorks

Para explicar el procedimiento de simulación en SolidWorks se seguirán los puntos del diagrama de flujo de la figura 40.

#### 4.3.1. Definición de relaciones de posición

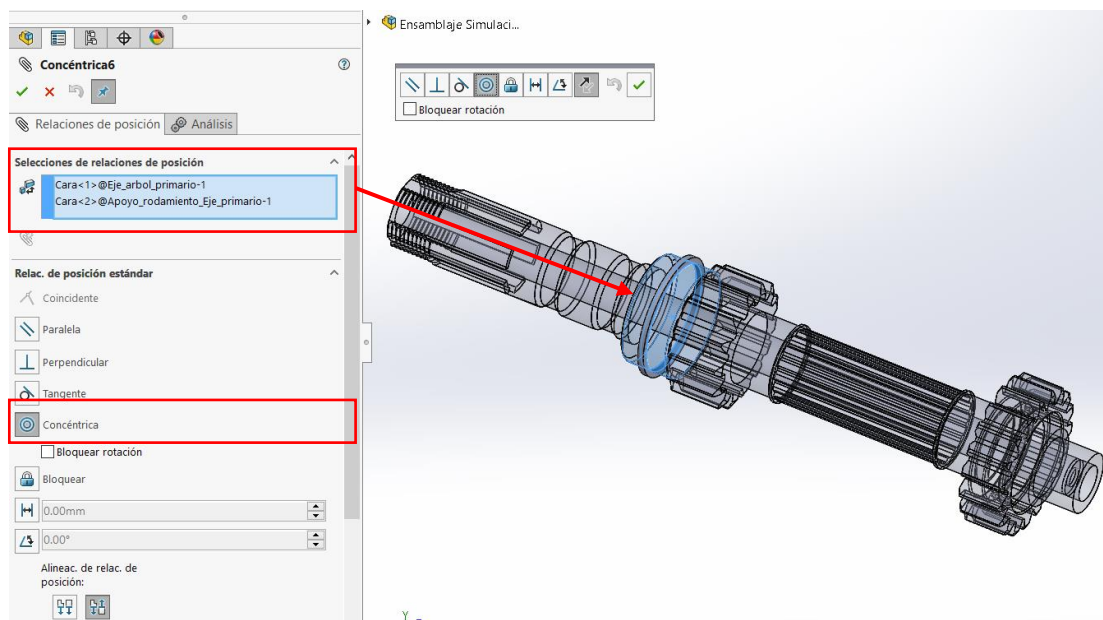
Se abrirá el programa SolidWorks y se elegirá el módulo *Ensamblaje*.

Como se ha explicado anteriormente, en este módulo se insertarán las piezas y se relacionarán entre si mediante las relaciones de posición.

Primero se ensamblará el conjunto eje primario, seguidamente se ensamblará el conjunto Eje Secundario y por último el tambor y las horquillas.

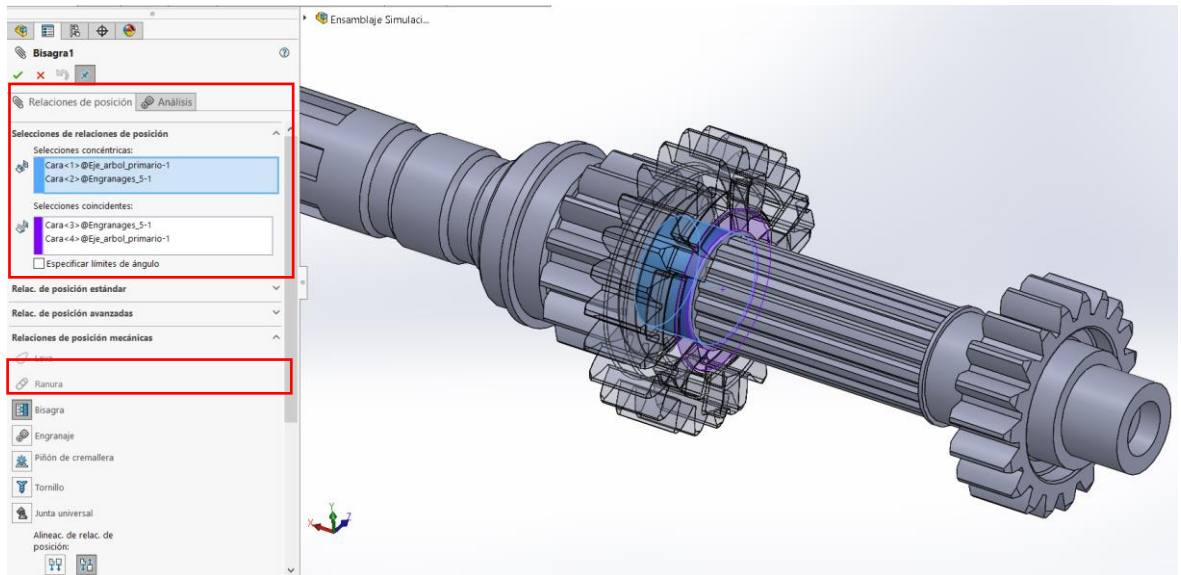
El primer elemento a insertar es el apoyo fijo del *Eje Primario*. SolidWorks define el primer elemento insertado como elemento fijo, esta propiedad se puede agregar a tantas piezas como se requiera. Teniendo el elemento fijo definido se pasa a insertar el *Eje Primario*, este se relacionará mediante las operaciones de concentricidad y distancia.

Las relaciones de posición estándar se definen mediante 2 elementos que se seleccionarán en la interfaz gráfica y saldrán mostradas en *Selecciones de relación de posición*.



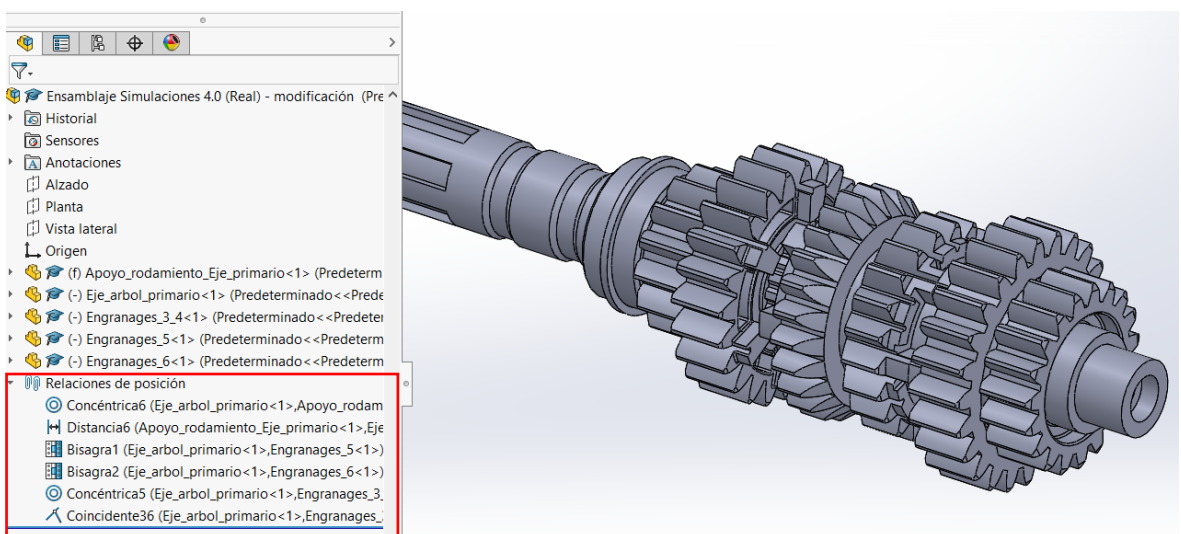
**Figura 76.** Definición de relación de posición estándar de concentricidad (Fuente: propia)

El siguiente paso es insertar los engranajes fijos independientes. Estos no tienen movimiento lineal sobre el eje y no tienen unión rígida con el eje. Para relacionar los engranajes con estas condiciones se utilizará la relación de bisagra (que combina la relación de posición estándar coincidencia y concetricidad).



**Figura 77.** Definición de relación de posición mecánica de bisagra (Fuente: propia)

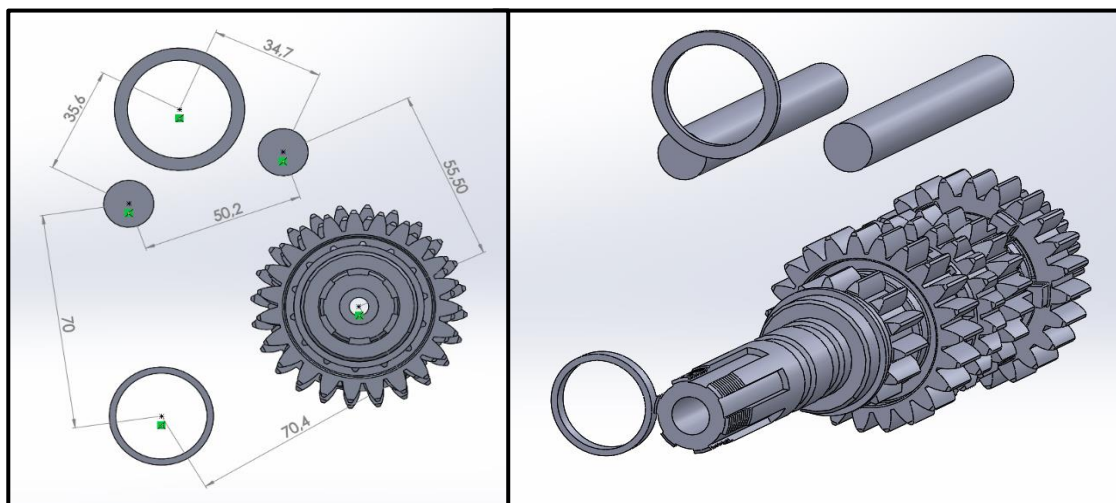
Por último, se insertarán los engranajes móviles que tienen un movimiento lineal y unión rígida sobre el eje. Para relacionar los engranajes con estas condiciones se utilizará la relación de concetricidad (para hacer concéntrico el engranaje con el eje) y la relación de coincidencia (para recrear la unión rígida con el eje).



**Figura 78.** Conjunto Eje primario ensamblado (Fuente: propia)

La colocación de los demás conjuntos será en referencia al primer conjunto ya ensamblado utilizando las medidas del sistema de transmisión original.

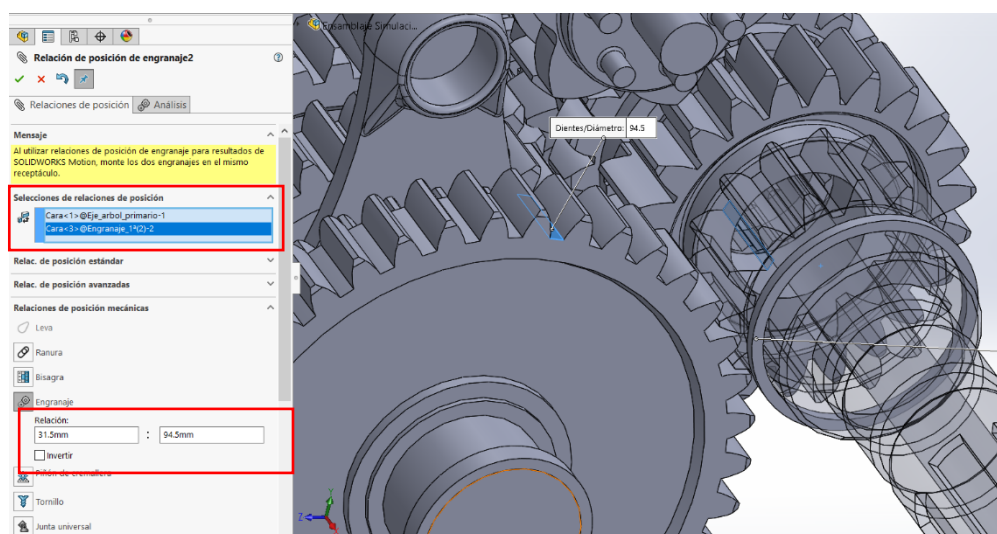
Primero se insertarán los apoyos fijos para los demás conjuntos.



**Figura 79.** Disposición y fijación de los elementos fijos del ensamblaje (Fuente: propia)

Se puede proceder a insertar y ensamblar las demás piezas. El tambor se relaciona con su apoyo fijo mediante dos relaciones de posición estándar, concentricidad y distancia. El eje secundario se relaciona de la misma manera que el tambor y eje primario a su apoyo fijo.

Los engranajes del eje secundario se relacionarán de la misma forma que los del eje primario. Con los engranajes ensamblados a los ejes se definirá la relación de transmisión entre ellos.

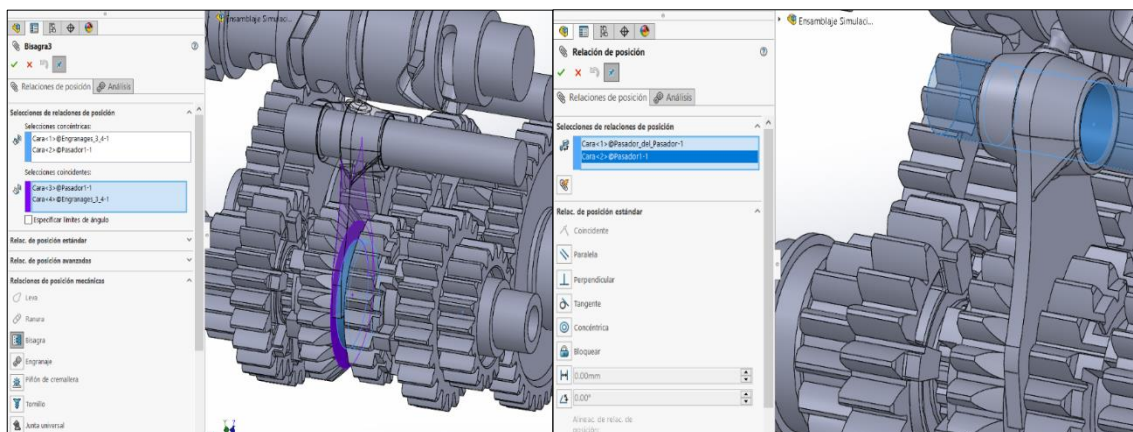


**Figura 80.** Definición de relación de posición mecánica de engranaje (Fuente: propia)



La relación de transmisión tiene que ser menor que 1 ya que este es un sistema reductor.

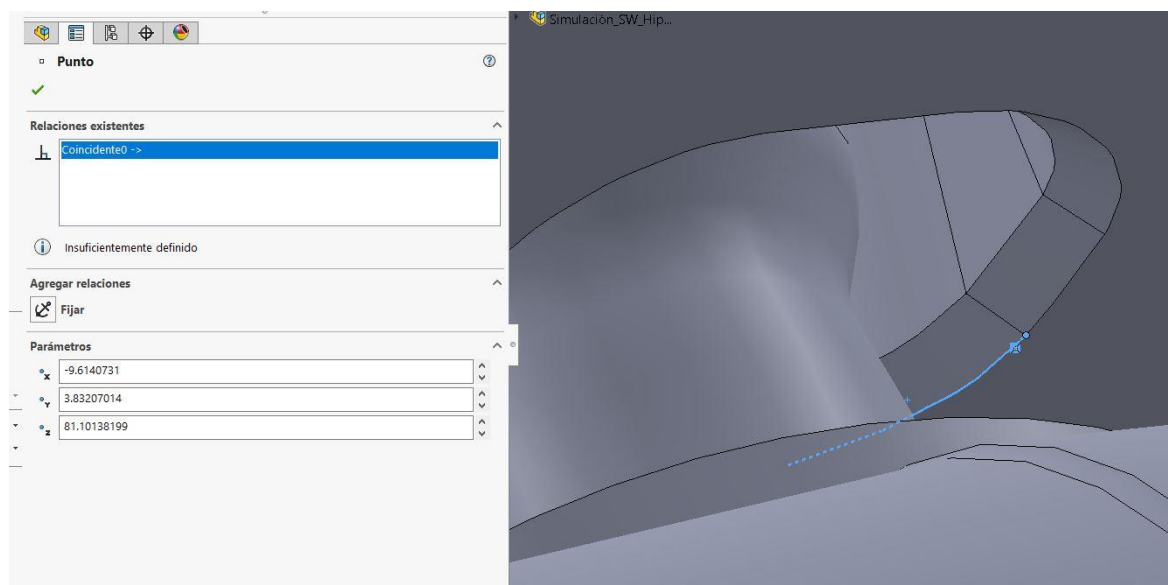
Por último, queda insertar las horquillas y relacionarlas con el apoyo fijo y a los engranajes móviles. Cada horquilla se relaciona con una relación de bisagra al engranaje móvil y una relación de concentricidad con su apoyo fijo.



**Figura 81.** Definición de relación de posición mecánica de bisagra y relación de posición estándar de coincidencia para la horquilla (Fuente: propia)

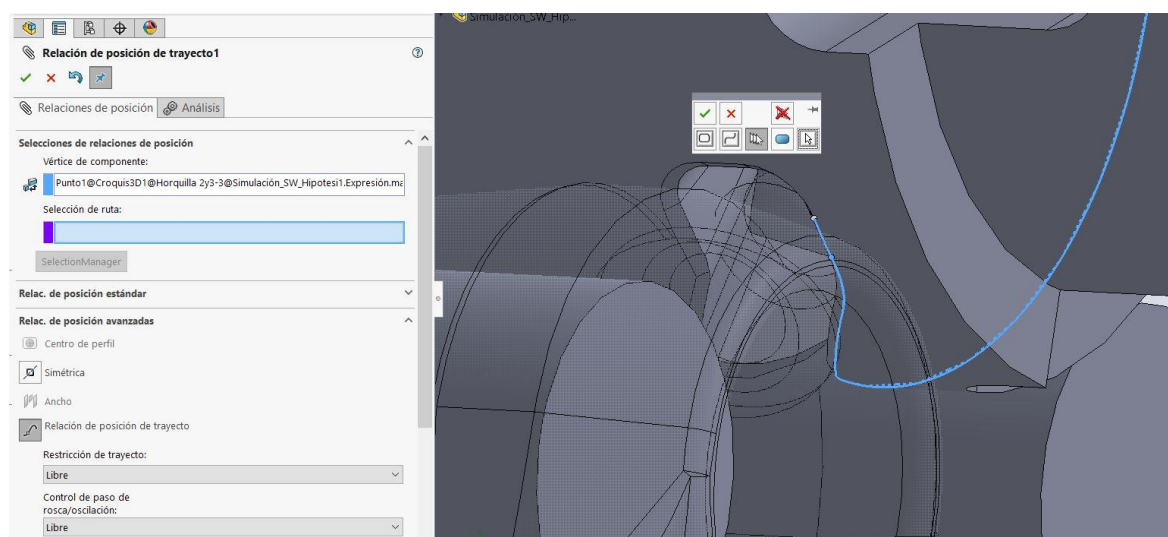
Llegado a este punto, se diseñará el cuerpo base del tambor, explicado detalladamente en el apartado 3.3.2. *Diseño a partir de un entorno previamente definido*). Diseñado el cuerpo base del tambor se procederá a realizar una simulación previa, tal y como se tiene el conjunto ensamblado hasta ahora, mediante la simulación por segmentos. La definición para esta simulación se explica en el apartado 4.3.2. *Definición de comandos*.

Cuando se haya diseñado el tambor completo, el siguiente paso sería relacionar las horquillas con el tambor mediante la relación de leva. No será posible ejecutar esta relación, ya que, aunque SolidWorks disponga de esta operación, no se puede definir debido a la forma compleja que tienen las guías del tambor. La solución está en utilizar la *relación de posición de trayecto*. Para aplicar esta relación, debemos crear un punto dentro de cada una de las horquillas, este punto será coincidente al perfil exterior de la curva guía del tambor.



**Figura 82.** Definición de punto coincidente al perfil de la curva guía (Fuente: propia)

Creado el punto, se puede definir la relación de posición avanzada *relación de posición de trayecto*. Para definir la posición de trayecto mediante *SelectionManager*, seleccionamos el perfil exterior de la curva guía. Esta relación de posición nos permitirá transformar el movimiento rotacional del tambor a un movimiento lineal en la horquilla.



**Figura 83.** Selección curva guía mediante SelectionManager (Fuente: propia)

Por otra parte, tampoco se pueden relacionar los engranajes móviles del mismo eje con los engranajes fijos independientes mediante relaciones cinemáticas, sólo sería posible con la utilización de relaciones dinámicas, por lo que no se obtendrá ningún movimiento en el eje secundario. La simulación

cinemática en SolidWorks toma una gran limitación para este conjunto. Para simular el conjunto cinemáticamente de forma total se utilizará el uso de motores para simular el movimiento del eje secundario. Aunque haya limitaciones en la simulación cinemática, *SolidWorks Motion* permite el uso de relaciones dinámicas, que permitirán la simulación completa de todo el sistema.

Definidas todas las relaciones de posición se tiene que colocar el conjunto a simular en la posición inicial de forma manual. La posición inicial, como bien se ha descrito antes, es en la posición de primera marcha. Este paso es necesario debido a que cuando es creado un estudio de movimiento toma como referencia inicial la posición en la que se deja el ensamblaje. Se puede cambiar manualmente *a posteriori* la posición, pero para optimizar tiempo es mejor tener el ensamblaje bien colocada en el inicio de la simulación.

Desde el menú de operaciones *ensamblaje* se crea un estudio de movimiento. Creado el estudio, desde el menú *complementos SolidWorks*, se activa el complemento *Motion* y como tipo de estudio se selecciona análisis de movimiento.

#### 4.3.2. Definición de comandos

Como hemos comentado en la introducción a la simulación, SolidWorks permite la realización de una simulación cinemática y dinámica. Para realizar la comparación respecto al programa CATIA V5 se realizarán tres hipótesis de estudio:

- Hipótesis 1: Simulación cinemática: se simula mediante relaciones cinemáticas (relaciones de posición definidas en el ensamblaje) bajo la actuación de comandos.
- Hipótesis 2: Simulación cinemática utilizando relaciones dinámicas: simulación donde se sustituirán los motores que transmitían el movimiento (el cual era imposible de transmitir mediante relaciones cinemáticas) por contactos (relaciones dinámicas).
- Hipótesis 3: Simulación dinámica: simulación donde aparte de sustituir los motores, también serán sustituidas las relaciones cinemáticas (que transmiten movimiento entre las piezas del ensamblaje) por relaciones dinámicas.

##### 4.3.2.1. Hipótesis 1

Los comandos a definir para la simulación mediante relaciones cinemáticas son:

- Motor rotativo para eje primario, eje secundario y tambor.
- Motor lineal para las horquillas

Únicamente se utilizará el motor lineal cuando se vaya a diseñar el tambor, ya que como no se tiene diseñado el tambor, tendremos que simular el movimiento de las horquillas de forma manual mediante este segundo motor adicional.

Estos comandos se definen en el generador de funciones de *SolidWorks Motion* de tres posibles maneras diferentes.

- Definición del movimiento del motor por segmentos.
- Definición del movimiento del motor por datos importados.
- Definición del movimiento del motor por expresión.

Se definirá el motor rotativo para el eje primario de estas tres formas para poder observar los diferentes métodos y de esa manera poder comparar y observar cuando será preciso el uso de estos. Los demás comandos serán definidos por segmentos.

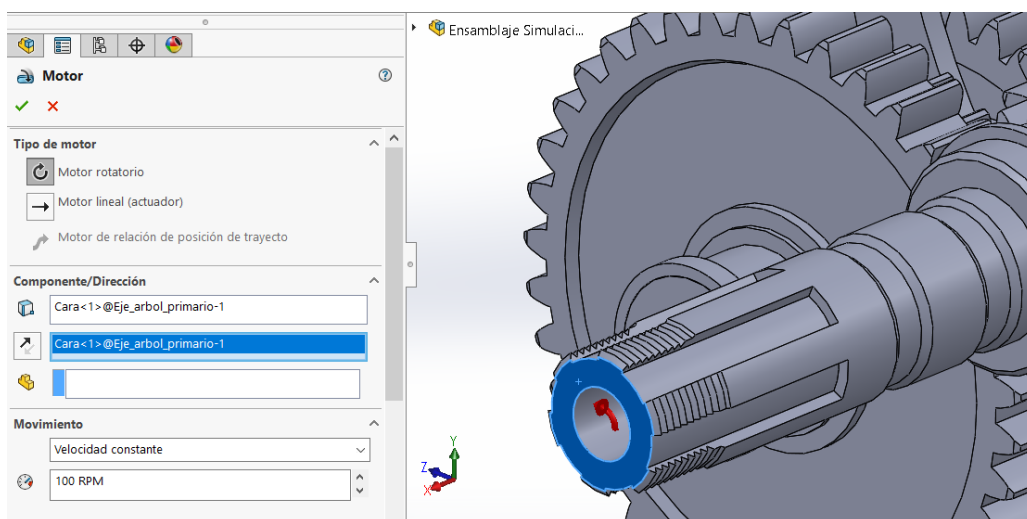
Se selecciona la operación *motor*.



**Figura 84.** Cuadro de herramientas de *SolidWorks Motion* (Fuente: propia)

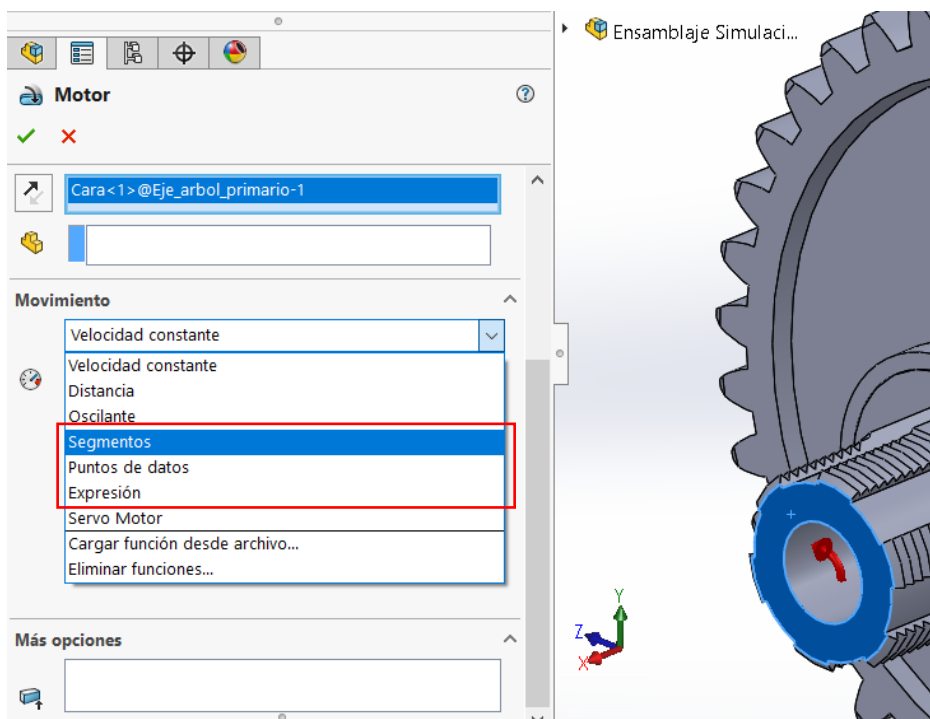
Desde el *MotionManager* se puede elegir si utilizamos un *motor rotativo* o *lineal* y seleccionar un elemento de referencia para la dirección en el avance del motor.

Se selecciona *motor rotativo* y como referencia de giro se seleccionará una cara que pertenezca al eje primario y a su vez sea perpendicular a su eje axial.



**Figura 85.** Creación de motor rotativo (Fuente: propia)

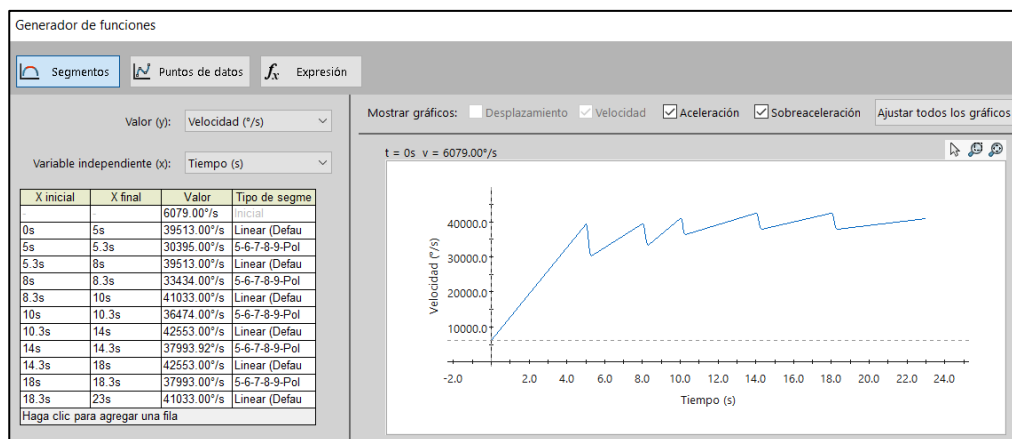
El movimiento se definirá a partir del generador de funciones de SolidWorks. Para entrar en el generador se elegirán una de las tres opciones siguientes:



**Figura 86.** Definición de motor rotativo (Fuente: propia)

#### 4.3.2.1.1 Definición por Segmentos

En la casilla *valor* se puede definir un motor según: desplazamiento, velocidad o aceleración. En nuestro caso, se elige velocidad en función del tiempo. Se insertarán los intervalos de tiempo que se deseen y correspondientemente los valores de velocidad en esos tiempos (estos datos se han obtenido del punto 2.4. *Inputs para la simulación*). El resultado final será el siguiente:



**Figura 87.** Definición por segmentos de la velocidad angular de entrada (Fuente: propia)

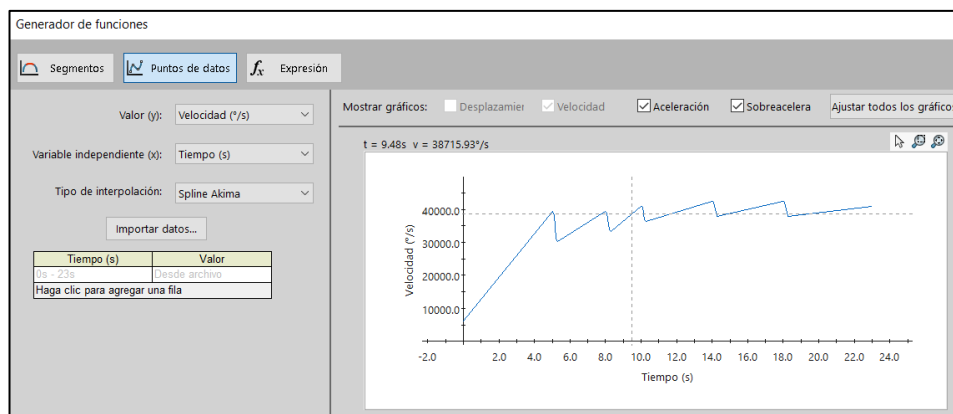
La definición por segmentos es válida en nuestro caso ya que no se tiene que definir el motor a partir de una gran cantidad de datos. Esto cambia en el caso de que los valores se hayan obtenido a partir de una experimentación y se encuentren en formato Excel. Siendo así, se procederá a definir el motor a partir de *puntos de datos*.

#### 4.3.2.1.2 Definición por *puntos de datos*

En nuestro caso, se importará la velocidad angular del movimiento del eje primario desde una hoja de Excel que contiene 2000 puntos de datos (a diferencia de la definición anterior que contenía 13 puntos de datos). Para importar los datos tienen que estar en formato Excel extensión CSV; los datos de tiempo y velocidad en la misma celda separados por comas.

	A	B	C	D
1				
2	Tiempo (sec),"Velocidad angular (deg/sec)"			
3	0,7199.9999917728			
4	0.00830131925187327,7372.73680143075			
5	0.01,7391.99999193538			
6	0.0108569763569764,7382.57405193701			
7	0.0167076570379554,7520.54730680085			
8	0.0195237581160913,7578.21650439309			
9	0.02,7583.99999209796			
10	0.0233997668997669,7777.49904131984			
11	0.0281366253095085,7749.24084850771			
12	0.03,7775.99999226054			
13	0.0312698412698413,7809.14328213566			
14	0.0383575740888626,389963.833441752			
15	0.04,7967.99999242312			
16	0.0487506057161304,8156.68953055638			
17	0.05,8159.9999925857			
18	0.0515513833992095,8190.53960777405			
19	0.059830520928347,8315.09212024269			
20	0.06,8351.99999274828			
21	0.07,8543.99999291086			

**Figura 89.** Datos en formato CSV para la exportación al generador de funciones (Fuente: propia)



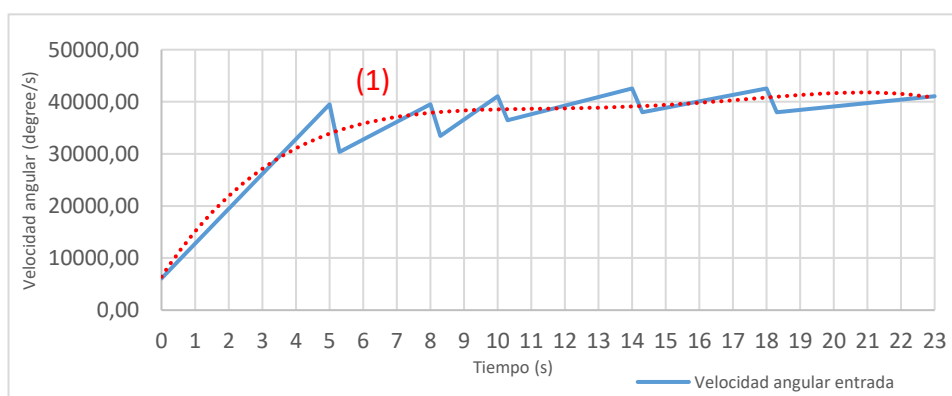
**Figura 90.** Datos en formato CSV para la exportación al generador de funciones (Fuente: propia)

Para graficar con mayor precisión es importante establecer que el tipo de interpolación sea *Spline Akima*. El generador de funciones representa la función proporcionada en la interfaz, pero se tiene que recalcar que cuanto mayor sea la cantidad de puntos de datos mejor trazada estará la *spline*.

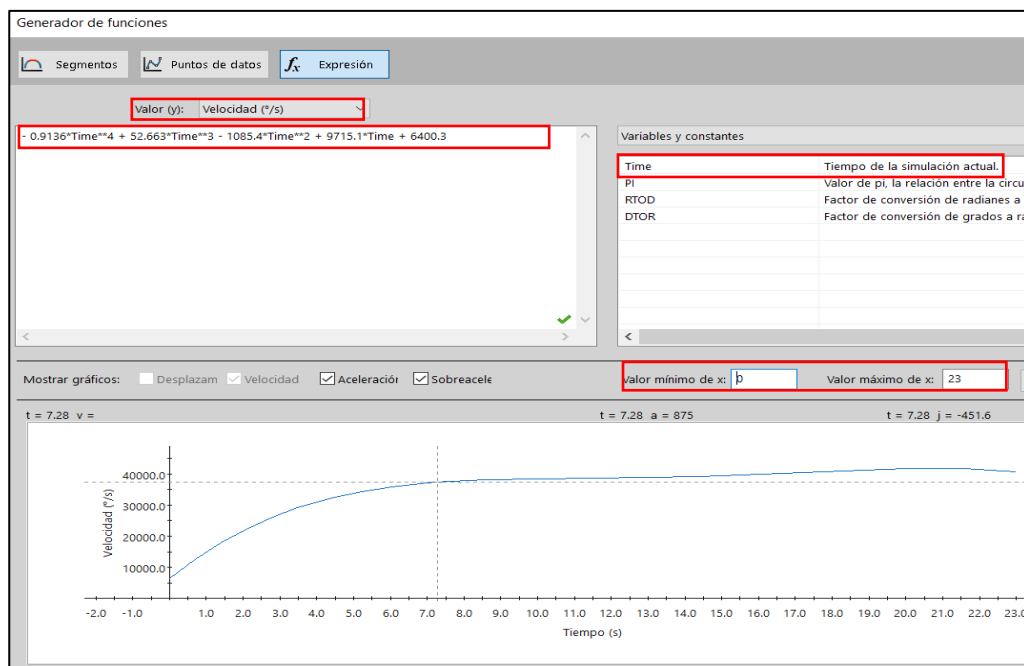
#### 4.3.2.1.3 Definición por Expresión

En caso de que el movimiento sea regido por una expresión matemática se definirá a partir de *Expresión*. Se definirá la expresión matemática que se ajusta a la función de movimiento de la velocidad angular de entrada.

$$y = -0,9136x^4 + 52,663x^3 - 1085,4x^2 + 9715,1x + 6400,3 \quad (1) \quad (\text{Eq. 4.4})$$



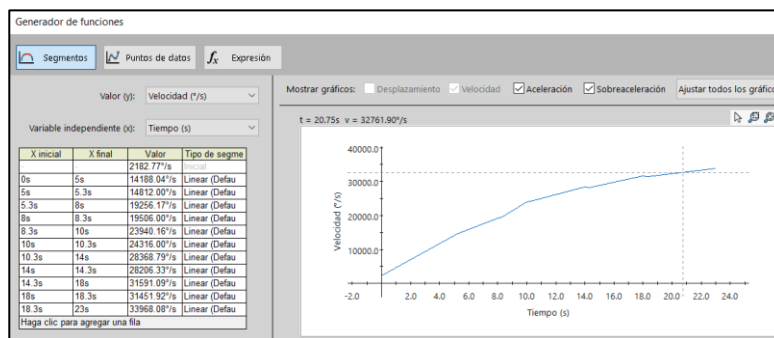
**Gráfica 2.** Velocidad angular de entrada en función del tiempo (Fuente: propia)



**Figura 91.** Datos en formato CSV para la exportación al generador de funciones (Fuente: propia)

El valor  $y$  es una magnitud del motor (desplazamiento, velocidad o aceleración), en este caso será desplazamiento, y la componente  $x$  es una variable propia de la simulación, en este caso será el tiempo de simulación. No es necesario escribir unidades en la función.

Los restantes motores definidos por segmentos quedarán de esta forma:



**Figura 92.** Velocidad angular de salida (Fuente: propia)



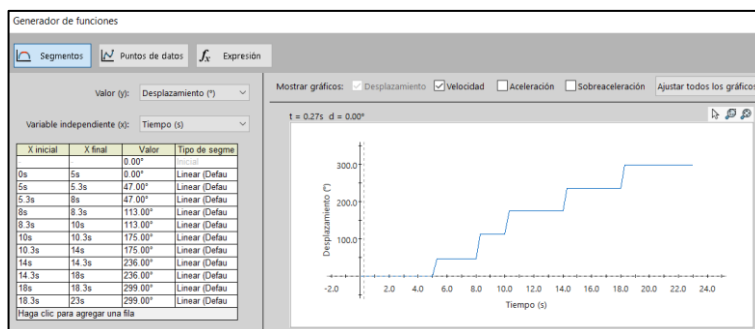


Figura 93. Desplazamiento angular tambor (Fuente: propia)

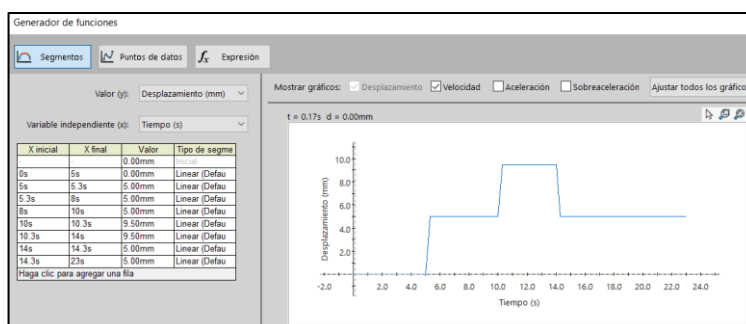


Figura 94. Desplazamiento lineal horquilla 1 (Fuente: propia)

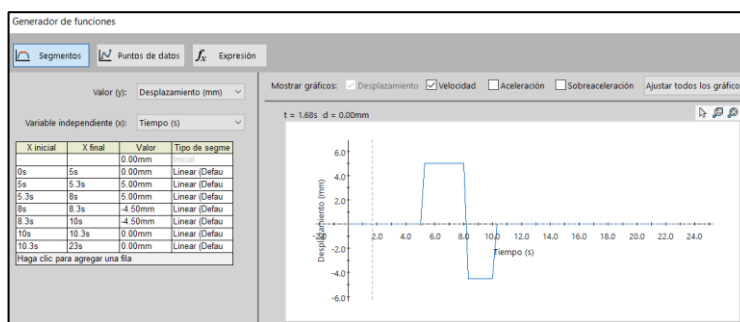


Figura 95. Desplazamiento lineal horquilla 2 (Fuente: propia)

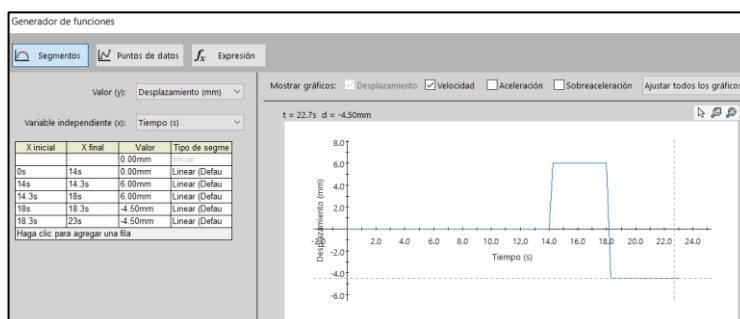
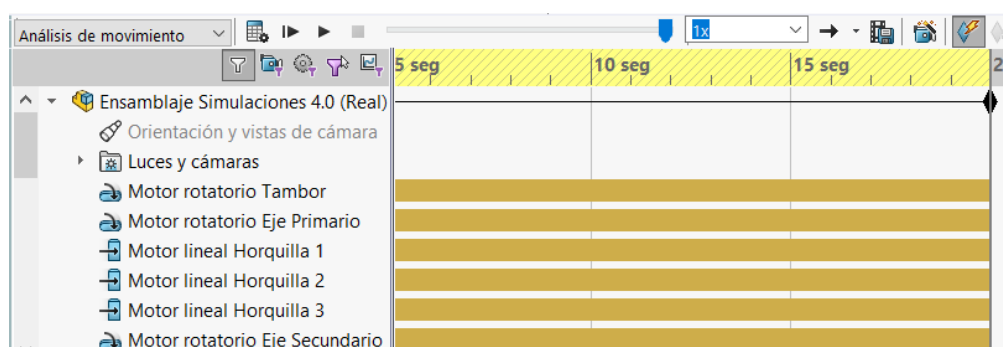


Figura 96. Desplazamiento lineal horquilla 3 (Fuente: propia)

Los motores creados quedarán colgando del *Motionmanager* del estudio de movimiento y se mostrará la durada de la actuación de estos motores.



**Figura 97.** Motores en *Motionmanager* (Fuente: propia)

En este punto ya se puede ejecutar la simulación mediante relaciones cinemáticas bajo la actuación de motores.

Un problema que se obtiene en *Motion* cuando se definen todos los parámetros para la simulación, es la intervención de redundancias en el conjunto ensamblado a simular. Para la eliminación de redundancias es importante definir de manera exacta el mínimo de relaciones de posición que se utilizarán. En este estudio, ya se ha ensamblado de este modo y a parte se han utilizado casquillos en las uniones donde SolidWorks ha detectado redundancias.

#### 4.3.2.2. Hipótesis 2

Esta simulación aproxima el estudio a un caso más real, ya que intervendrán contactos entre componentes y se suprimirán los motores que simulaban el movimiento que no se podía transmitir mediante las relaciones cinemáticas.

Motores a definir:

- Motor rotativo eje primario.
- Motor rotativo tambor.

Los otros motores no serán definidos ya que el movimiento será transmitido mediante contactos.

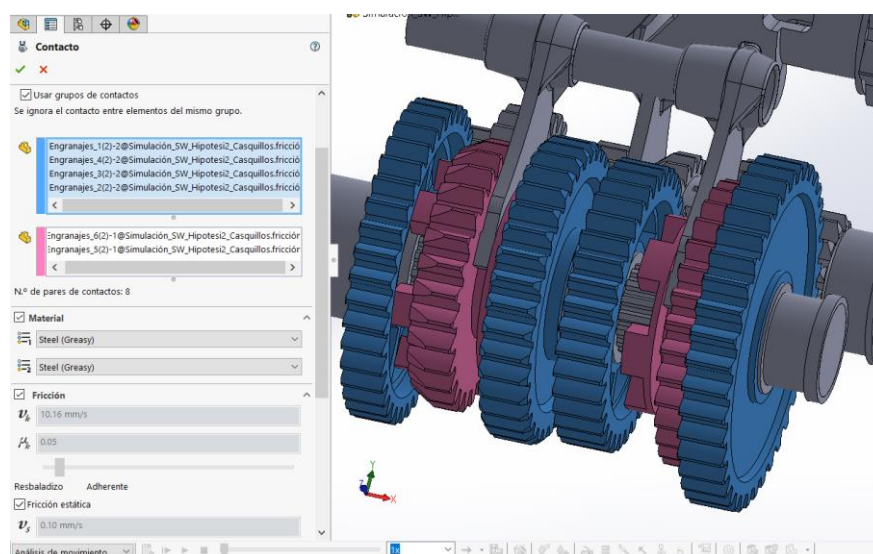
Se utilizará el mismo motor del estudio anterior, por lo que se hará una copia de este estudio cinemático y se eliminarán los motores restantes.

Los contactos entre piezas que se agregarán serán:

- Contactos entre horquillas y tambor.
- Contactos entre los engranajes móviles y engranajes independientes del mismo eje.

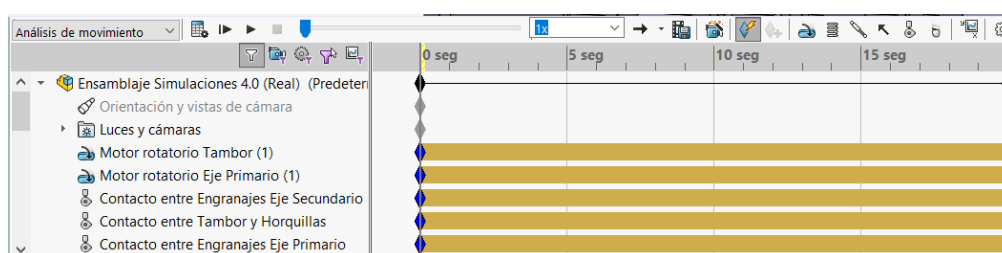
Se mantendrán las relaciones cinemáticas de bisagra entre las horquillas y los engranajes, la relación de engranaje entre los engranajes de los ejes y las relaciones de coincidencia entre los engranajes móviles y los ejes. Se utilizarán grupos de contactos (para intentar tener en el *Motionmanager* la menor cantidad de operaciones de contactos definidas para la fluidez de la simulación).

Se seleccionará la opción de *grupos de contactos* ya que se están relacionando más de dos piezas. Un grupo lo formará el tambor y el otro grupo las horquillas. Para conseguir que la simulación sea más real, se agregará material de contacto y fricción.



**Figura 98.** Definición de grupos de contacto entre los engranajes del eje secundario (Fuente: propia)

Los contactos colgarán del *MotionManager* cómo los motores.



**Figura 99.** Contactos en *Motionmanager* (Fuente: propia)

#### 4.3.2.3. Hipótesis 3

En este estudio, los motores y relaciones de posición cinemáticas que transmiten movimiento serán sustituidos por relaciones dinámicas, es decir, toda la transmisión de movimiento será transmitida solamente por contactos físicos.

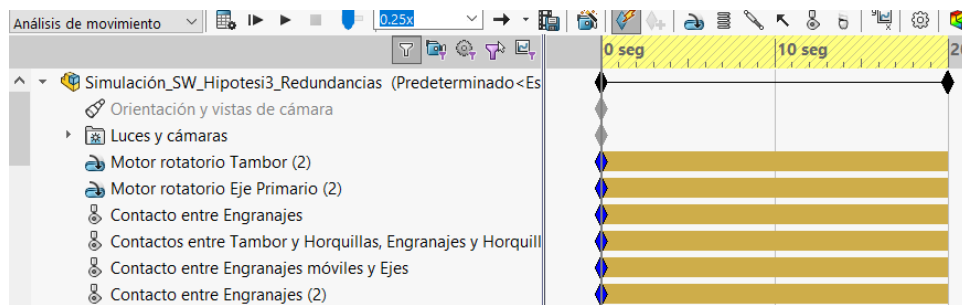
Motores a definir:

- Motor rotativo eje primario.
- Motor rotativo tambor.

Los contactos entre piezas que se agregarán serán:

- Contacto entre horquillas y tambor.
- Contacto entre horquillas y engranajes móviles
- Contacto entre los engranajes móviles y engranajes independientes del mismo eje y contacto entre los engranajes de ejes diferentes.
- Contacto entre engranajes móviles y ejes.

Se mantendrán las relaciones cinemáticas de bisagra entre los engranajes fijos independientes y los ejes. La creación de los contactos es análoga a la *hipótesis 2*, pero en este caso, insertando más componentes en los grupos de contactos.



**Figura 100.** Resultado final *hipótesis 3* en *Motionmanager* (Fuente: propia)

#### 4.3.3. Ejecución simulación

En Solidworks se puede hacer simulación cinemática y/o dinámica. Para ejecutar la simulación se tendrán que preparar los parámetros para esta.

##### 4.3.3.1. Hipótesis 1

Para una simulación cinemática los parámetros a modificar serán los siguientes:

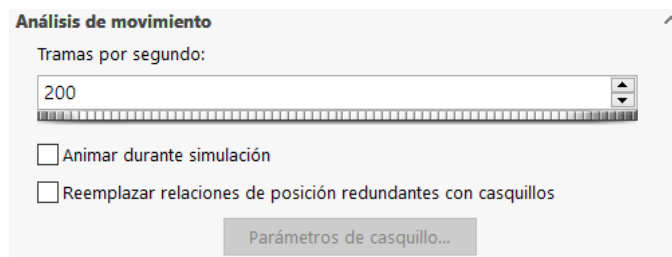


Figura 101. Ajustes de simulación (Fuente: propia)

- Las tramas por segundo. Además, se puede elegir animar el movimiento durante el cálculo de la simulación. Si se elige no animar la simulación permitirá un cálculo más rápido. La simulación se efectuará a 200 tramas.
- Integrador de cálculo y paso del integrador. Se escogerá el tipo de integrador más potente (WSTIFF), ya que con los demás no se podría simular nuestro conjunto. El inconveniente de este integrador es que ralentizará el tiempo de cálculo. Los demás datos los dejaremos por defecto.

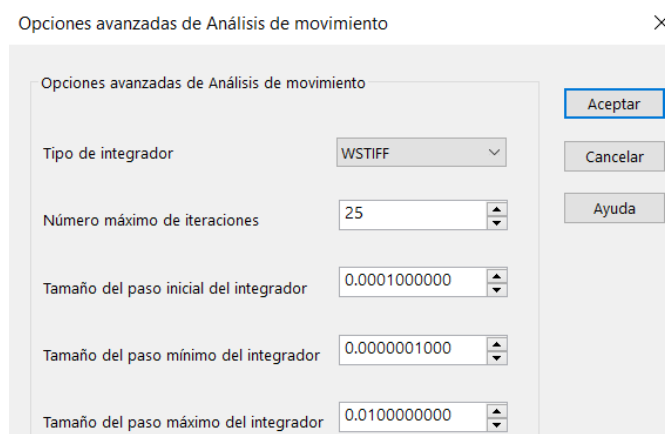


Figura 102. Opciones avanzadas de simulación (Fuente: propia)

#### 4.3.3.2. Hipótesis 2

Para una simulación en la que intervienen contactos, los parámetros a modificar serán los mismos, incluyendo, la resolución de contacto. El tamaño de paso del integrador será reducido hasta que se pueda realizar la simulación. En este caso se ha reducido un 10% respecto la simulación cinemática.

Para esta simulación se simulará a 200, 500 y 750 tramas. Para estas, se utilizará contacto medio, contacto medio y contacto alto, respectivamente. Observando con que parámetros se obtienen

resultados más precisos, se escogerá la configuración seleccionada y se intentará mejorar los resultados introduciendo redondeos y mejorando la colocación de las piezas.

#### 4.3.3.3. Hipótesis 3

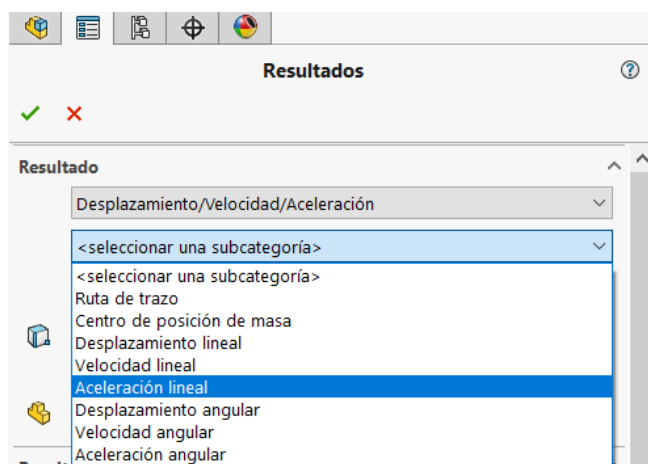
Para esta hipótesis se simulará a 200 tramas. Para esta trama se impondrá contacto medio-alto.

#### 4.3.4. Resultados

En este apartado, además de mostrar los resultados analíticos que se han obtenido con *SolidWorks Motion*, se compararán la extracción de resultados comparando las hipótesis de simulación.

##### 4.3.4.1. Magnitudes cinemáticas

Estos resultados pueden ser obtenidos desde la *hipótesis 1* hasta la 3. En la siguiente imagen se muestra las magnitudes cinemáticas que se pueden extraer con el *SolidWorks Motion*. En este estudio se sacarán resultados de: ruta de trazo, desplazamientos lineales y velocidades angulares.

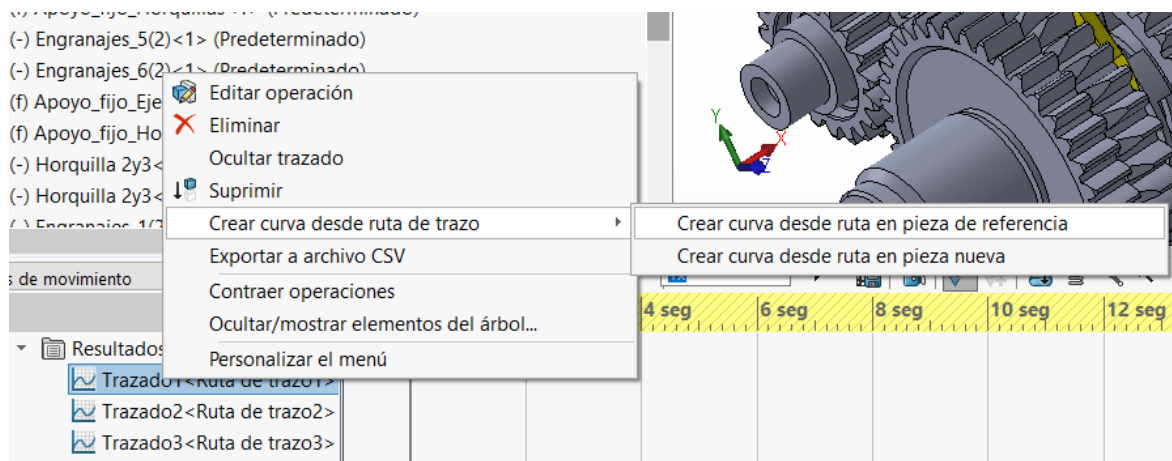


**Figura 103.** Resultados de magnitudes cinemáticas (Fuente: propia)

##### 4.3.4.1.1 Ruta de trazo

Como se ha comentado en el mismo apartado de la simulación en *DMU Kinematics*, obtener rutas de trazo permite el diseño o rediseño de componentes que dependen del movimiento que se producirá en un conjunto. En *SolidWorks Motion*, las rutas de trazo se forman a partir de puntos y se muestran visibles en la interfaz (como una curva). Estos resultados son generados en el *MotionManager* y guardados en el fichero *Assembly*. Se podrán pasar a un fichero *Part*, si se desea; si son puntos que sólo

dependen de dos coordenadas, es decir, que pueden ser representados todos en un mismo plano, *SolidWorks Motion* nos los trasladará en forma de *croquis*. Por lo contrario, si son puntos definidos por tres coordenadas (como es en nuestro caso), *SolidWorks Motion* no los podrá exportar de forma predeterminada a un *croquis* 3D.



**Figura 104.** Exportación ruta de trazo a croquis (Fuente: propia)

Se deben hacer unos pasos intermedios para poder pasar una ruta de trazo compleja a una pieza.

La ruta de trazo se exportará en formato CSV. Una vez se obtiene este formato, se observa que *SolidWorks Motion* nos ha trasladado todos los puntos que representan la posición del cabezal de la horquilla sobre el tambor. Este método tiene un problema y este reside en que cuando la horquilla permanece parada, *SolidWorks Motion* sigue recogiendo datos de puntos, por lo que se obtiene una gran cantidad de puntos repetidos.

El siguiente paso es pasar los datos de la ruta de trazo a la pieza referenciada, que en este caso es el tambor. Para crear una curva a partir de datos externos en SolidWorks, se utilizará la herramienta *curva por puntos XYZ*, pero esta, si encuentra puntos repetidos nos devolverá un error de lectura de los datos. Debido al problema comentado anteriormente, la única solución encontrada es borrar de forma manual desde el fichero CVS los datos repetidos. Adicionalmente, esta herramienta sólo lee archivos propios de curvas creadas y guardadas previamente en SolidWorks o datos en formato TXT, por lo que se debe pasar de forma manual los datos a TXT.

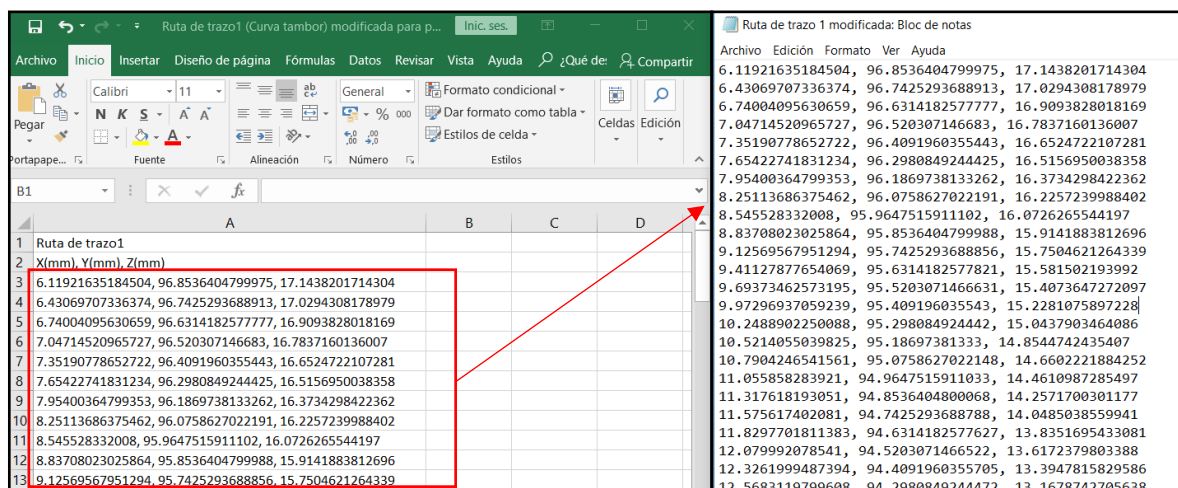


Figura 105. Exportar datos XLS a formato TXT (Fuente: propia)

Con la obtención de un fichero de datos en formato TXT se puede crear la curva.

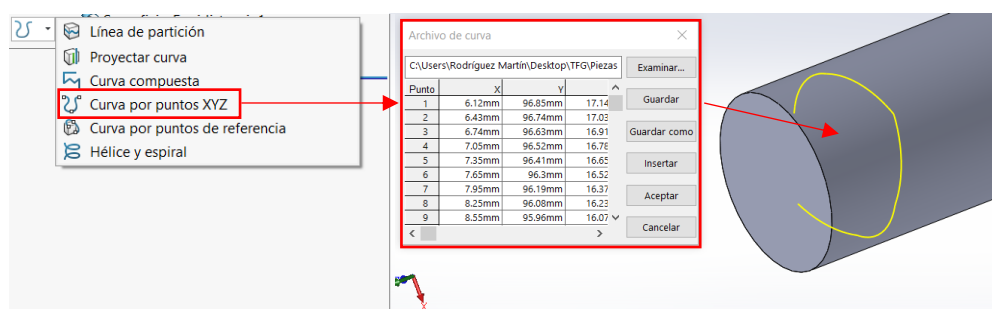


Figura 106. Definición curva por puntos XYZ (Fuente: propia)

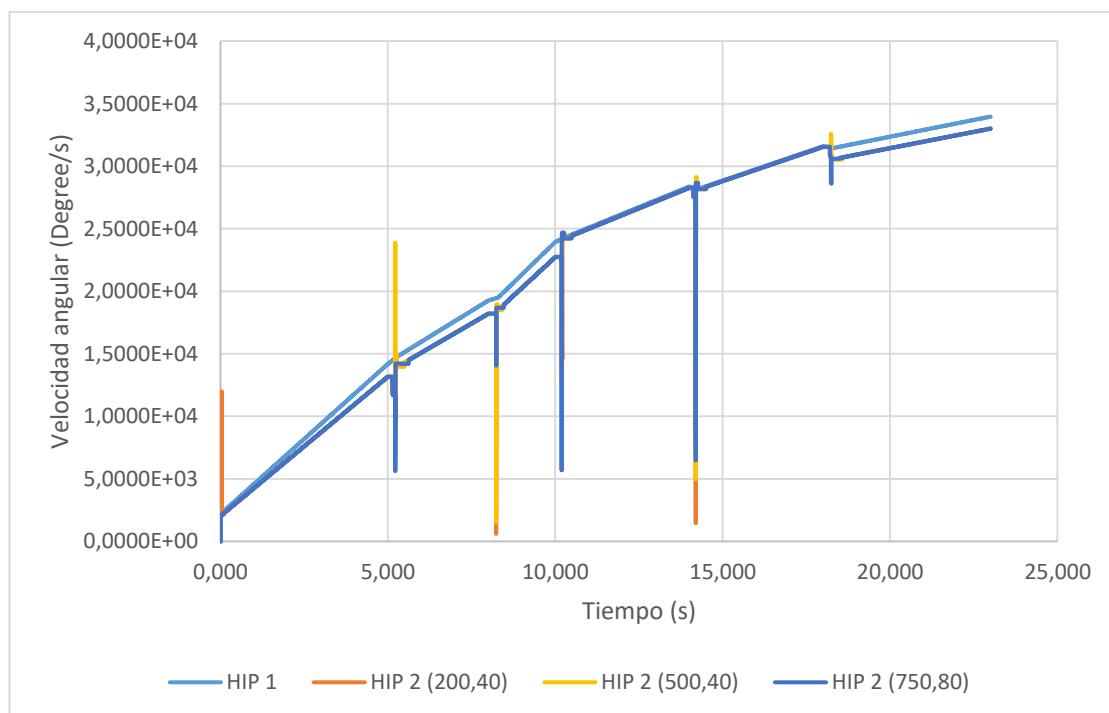
#### 4.3.4.1.2 Velocidad angular de salida

##### 4.3.4.1.2.1 Hipótesis 1 y 2

En la siguiente gráfica se puede observar los resultados graficados de la simulación (exportados de SolidWorks) de la *hipótesis 2* a 200, 500 y 750 tramas, frente a la hipótesis 1. A partir de estos resultados, se podrá apreciar si aparece una gran diferencia de precisión cuando se simula de menor a mayores tramas. Los resultados obtenidos son:

- Trama 200: 4 minutos
- Trama 500: 27 minutos
- Trama 750: 62 minutos



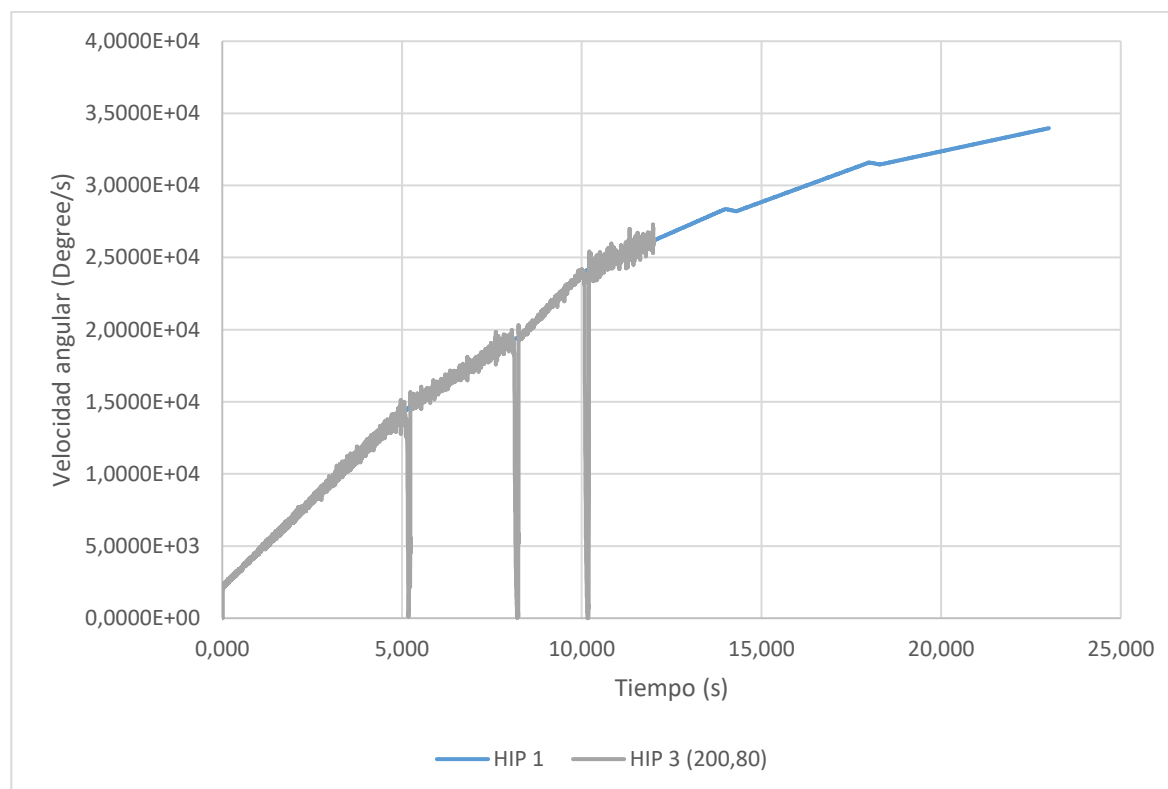


**Gráfica 6.** Velocidad angular del eje secundario en hipótesis 1 y 2 (Fuente: propia)

En este gráfico, no se observa ninguna diferencia significativa cuando se simula en diferentes tramas. La única diferencia significativa en el cálculo es el tiempo de cálculo de simulación. También se aprecia el contacto entre los engranajes fijos y móviles. Debido a este choque se nos muestra una velocidad menor en la hip 2 respecto en la 1. Esto nos lleva a un caso de simulación más realista donde se pueden apreciar estas pérdidas de energía debido al contacto.

#### 4.3.4.1.2.2 Hipótesis 1 y 3

El tiempo de simulación de la hipótesis 3 fueron 8 horas y 30 minutos, en ese instante, la simulación se detuvo de forma manual (ya que era innecesario alargar el tiempo de cálculo ya que teníamos los suficientes datos para poder comparar). El tiempo de simulación es más largo respecto las demás simulaciones, ya que para poder simular todo el conjunto mediante relaciones dinámicas es necesario definir un paso de integrador pequeño y un contacto alto.



**Gráfica 7.** Velocidad angular del eje secundario en *hipótesis 1* y *3* (Fuente: propia)

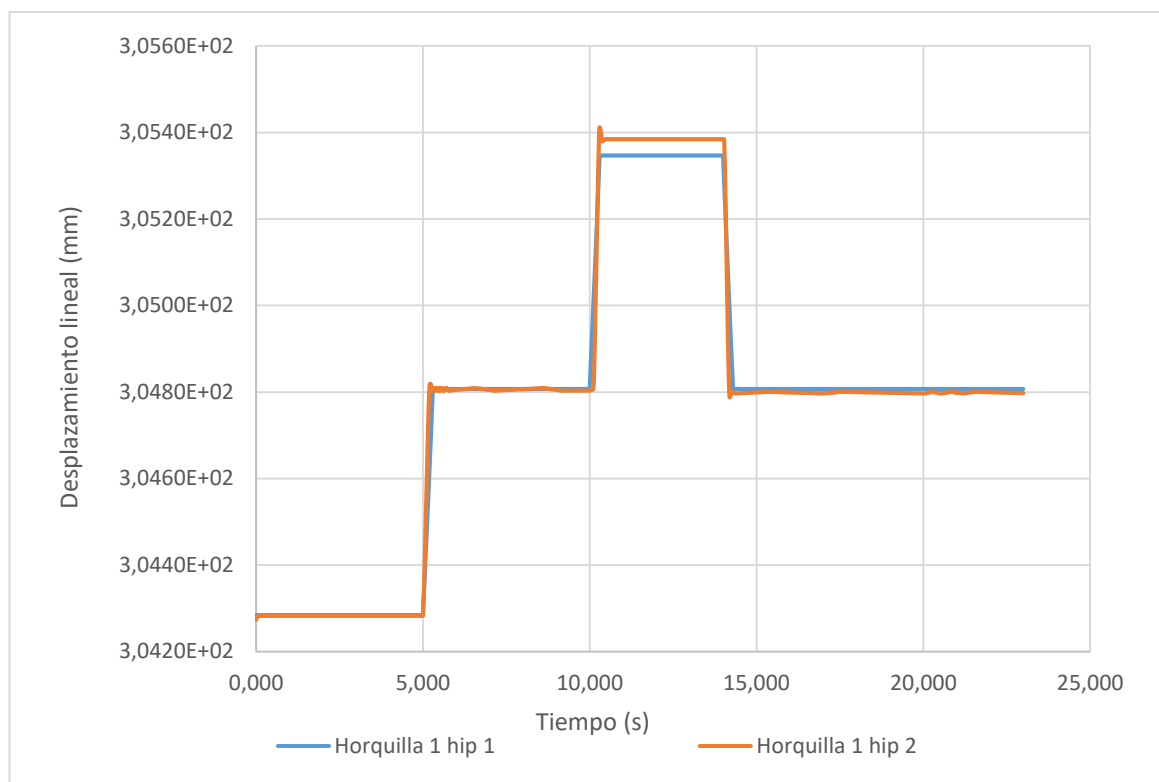
A diferencia de la *hipótesis 1* y *2*, en la *hipótesis 3* (debido a que ha sido simulada solamente con relaciones dinámicas) se puede llegar a observar la vibración entre componentes ya que nos gráfica una velocidad un tanto irregular. En este gráfico se muestran los resultados más realistas frente los que se podrían obtener en todas las simulaciones.

#### 4.3.4.1.3 Desplazamiento lineal de las horquillas

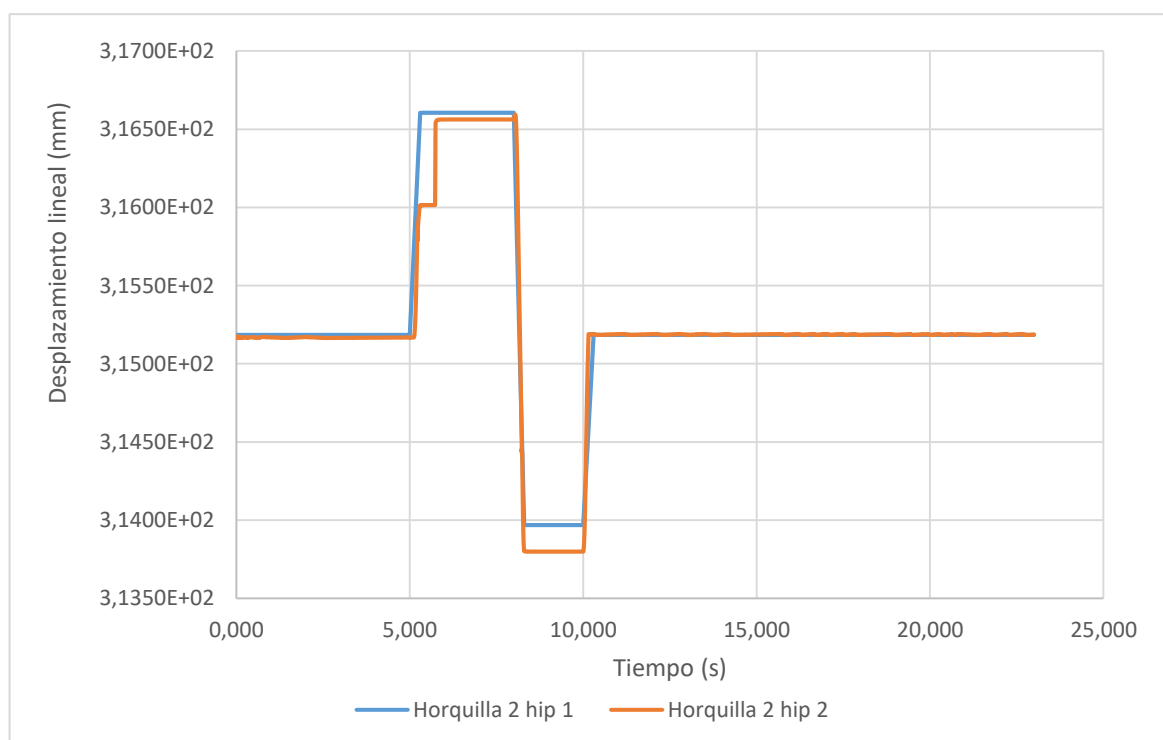
En este apartado, se obtendrá el desplazamiento lineal que tienen las horquillas.

##### 4.3.4.1.3.1 *Hipótesis 1* y *2*

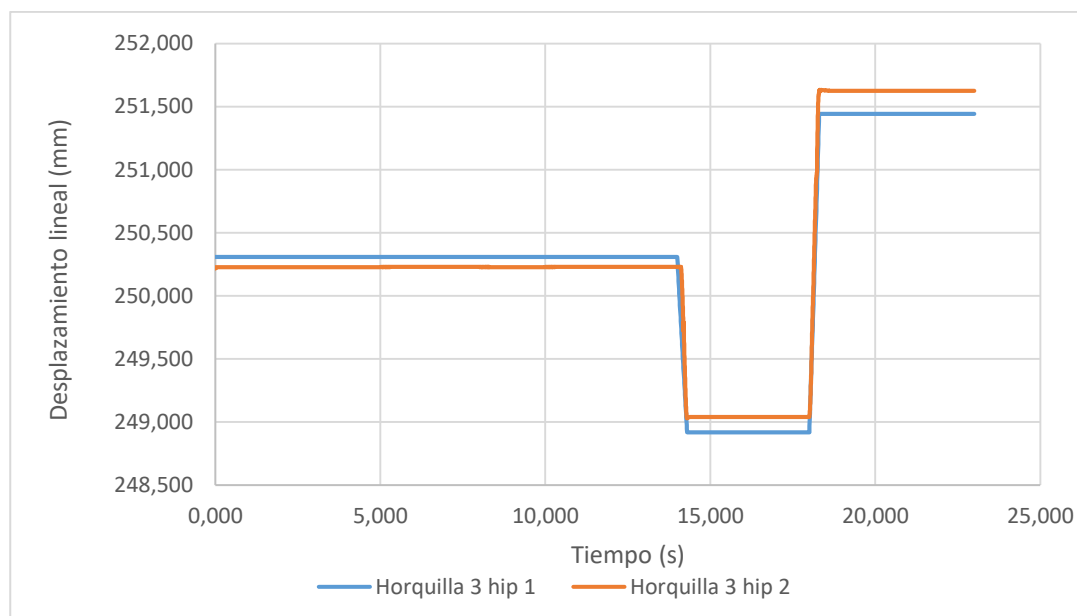
En las siguientes gráficas exportadas desde SolidWorks a Excel, se muestra el desplazamiento lineal de las horquillas en la *hipótesis 1* y *2*. Se puede apreciar que el desplazamiento lineal en la *hipótesis 2* no es el mismo que el de la *hipótesis 1* (esto es debido la utilización de relaciones dinámicas) ya que se perciben los choques entre los engranajes. Como consecuencia la *hipótesis 2* nos muestra un resultado más realista.



**Gráfica 8.** Desplazamiento lineal de la *horquilla 1* en hipótesis 1 y 2 (Fuente: propia)



**Gráfica 9.** Desplazamiento lineal de la *horquilla 2* en hipótesis 1 y 2 (Fuente: propia)



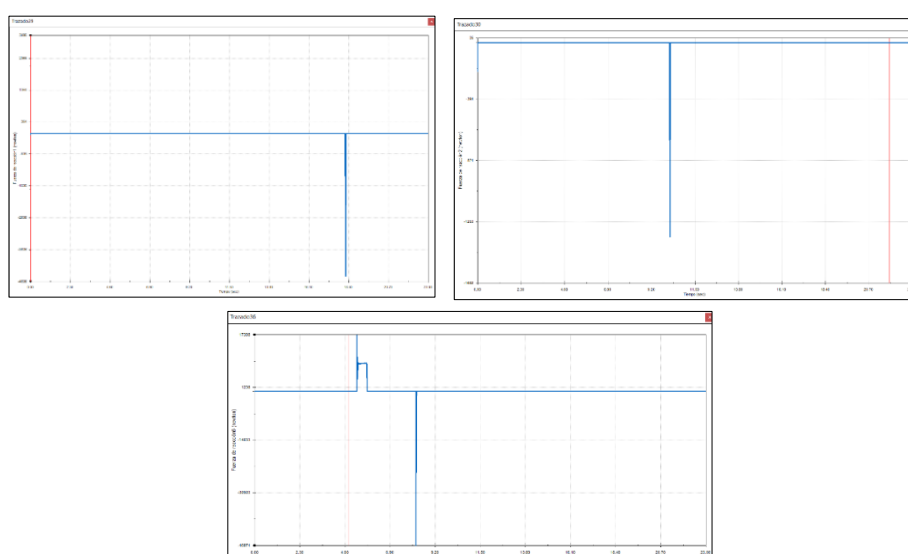
**Gráfica 10.** Desplazamiento lineal de la *horquilla 3* en *hipótesis 1* y *2* (Fuente: propia)

#### 4.3.4.2. Magnitudes dinámicas

En este apartado se mostrará un resultado de magnitud dinámica. Como se ha podido observar en los resultados cinemáticos, los choques entre los engranajes se hacían bastante visibles. Por este motivo, se ha extraído la fuerza que se genera en la colisión.

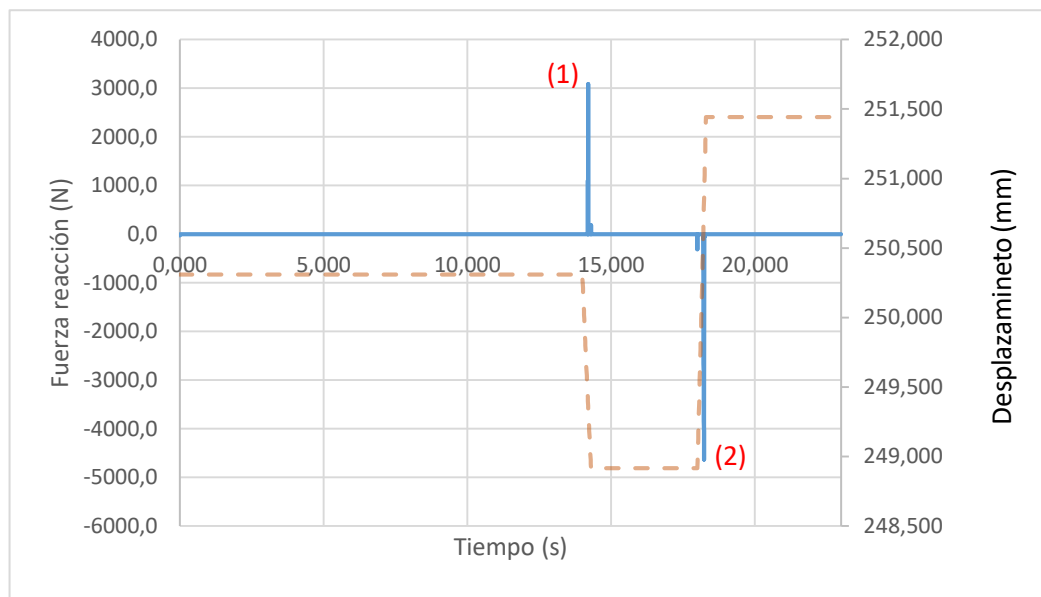
##### 4.3.4.2.1 Fuerzas de reacción en la colisión entre los engranajes móviles y fijos

La siguiente imagen (figura 107) muestra las gráficas de fuerza de reacción generadas por SolidWorks.

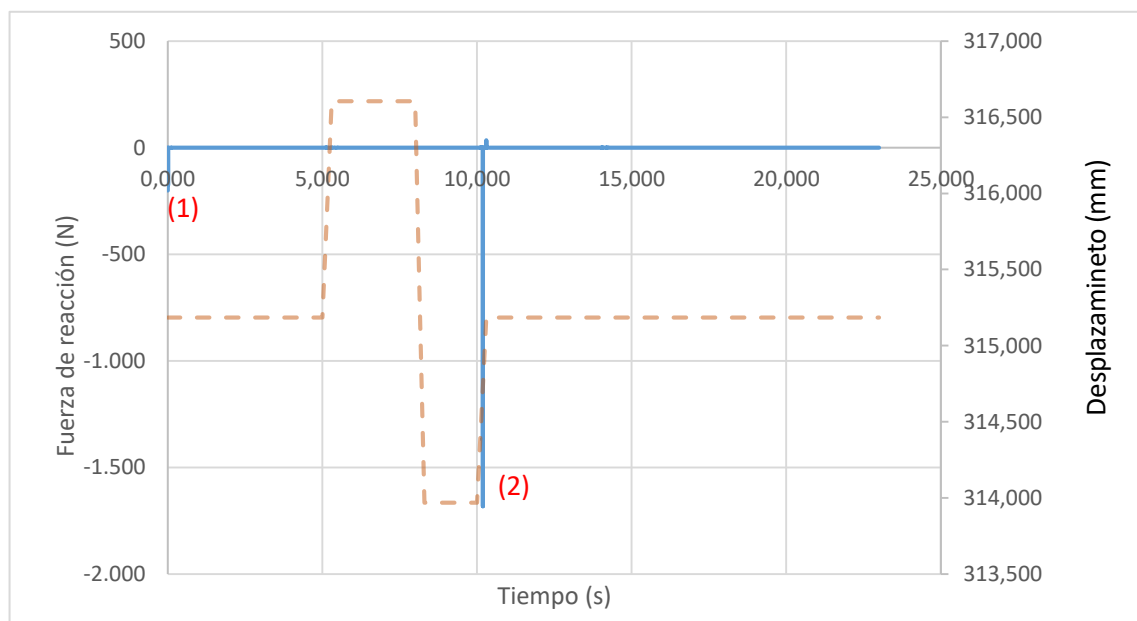


**Figura 107.** Gráficas de la fuerza de reacción de la colisión entre los engranajes móviles y fijos mostradas por SolidWorks (Fuente: propia)

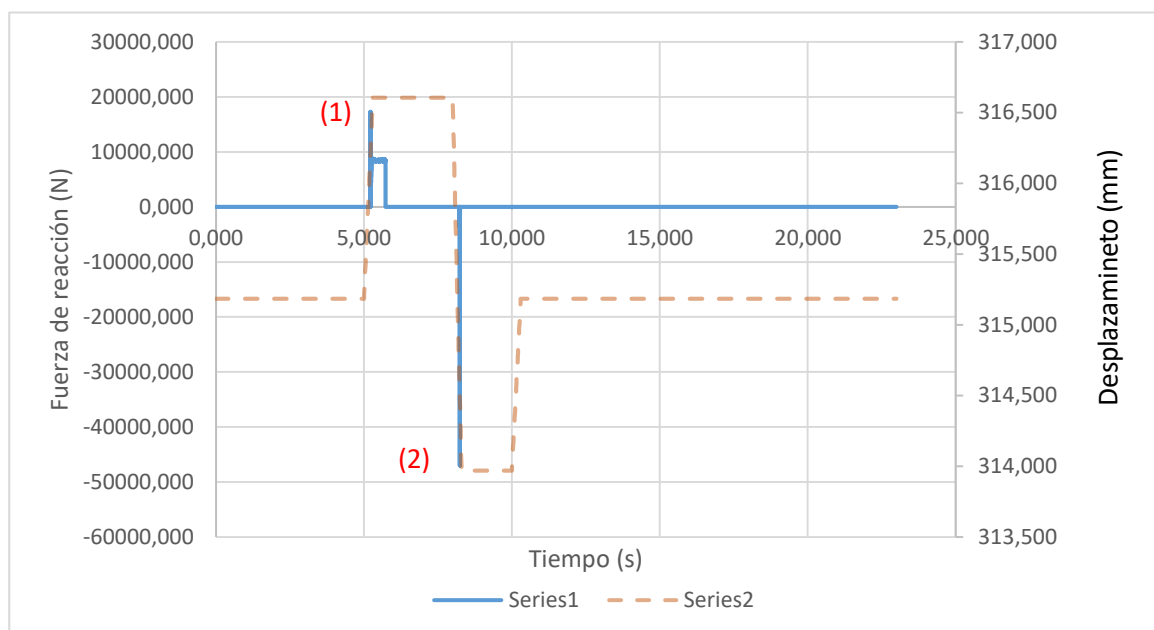
Como los datos desde el *Solidworks Motion* no se aprecian de una forma clara estos trasladarán a Excel y se solaparán con los resultados extraídos del desplazamiento lineal de las horquillas (para tener una visión general de en qué momento se produce la colisión entre engranajes fijos y móviles).



**Gráfica 11.** Fuerza de reacción entre la colisión del *Engranaje 3\_4* (1) y con *Engranajes\_5*(1) (1) y *6*(1) (2) (Fuente: propia)



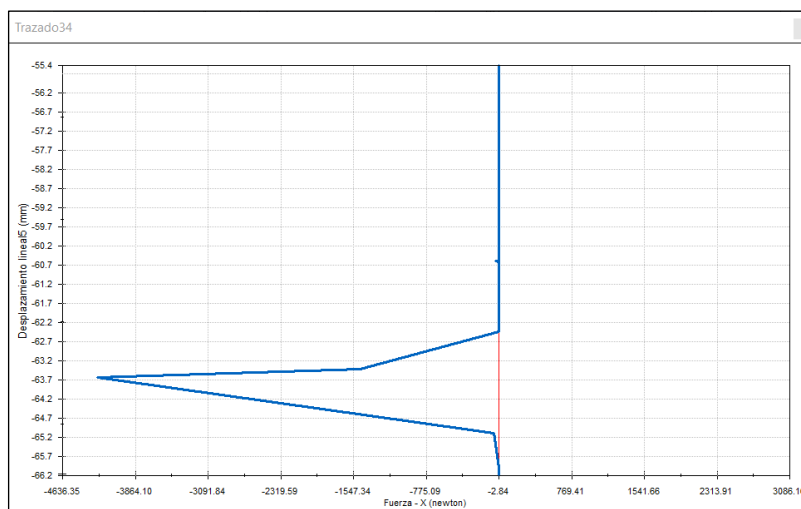
**Gráfica 12.** Fuerza de reacción entre la colisión del *Engranaje\_5(2)* con *Engranajes\_1(2)* (1) y *\_4(2)* (2) (Fuente: propia)



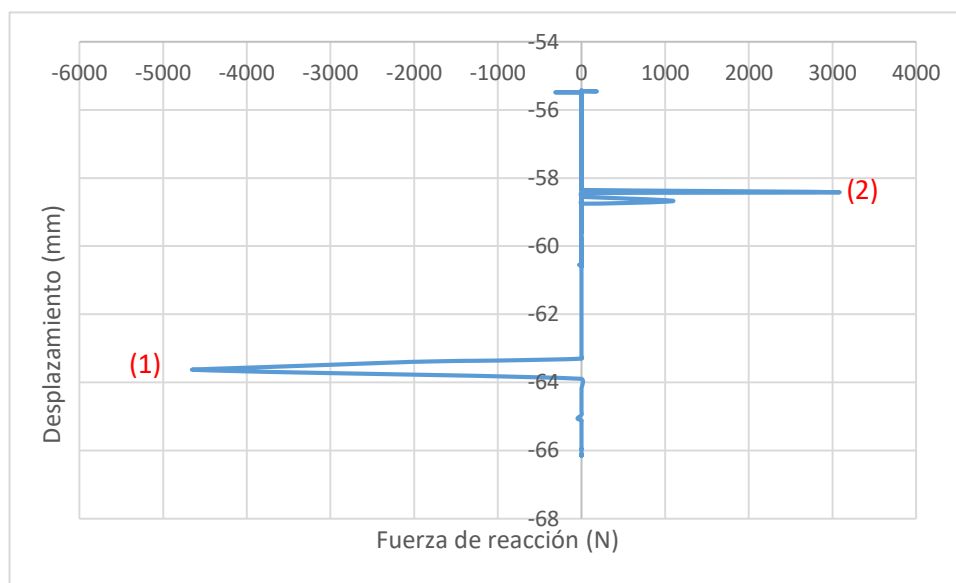
**Gráfica 13.** Fuerza de reacción entre la colisión del *Engranaje\_6(2)* con *Engranajes\_2(2)* (1) y *\_3(2)* (2) (Fuente: propia)

#### 4.3.4.3. Resultados combinados

A continuación, se mostraran resultados graficados del desplazamiento de la *horquilla 3* en función de la fuerza de reacción producida en la colisión del *Engranaje\_3\_4(1)* con los *Engranajes\_5(1)* y *\_6(1)*.



**Figura 108.** Desplazamiento de la *horquilla 3* en función de la fuerza de reacción entre la colisión del *Engranaje\_3\_4 (1)* y con *Engranajes\_5(1)* y *\_6(1)* (Fuente: propia)



**Gráfica 14.** Desplazamiento de la *horquilla 3* en función de la fuerza de reacción entre la colisión del *Engranaje 3\_4* (1) y con *Engranajes\_5(1)* (1) y *\_6(1)* (2) (Fuente: propia)

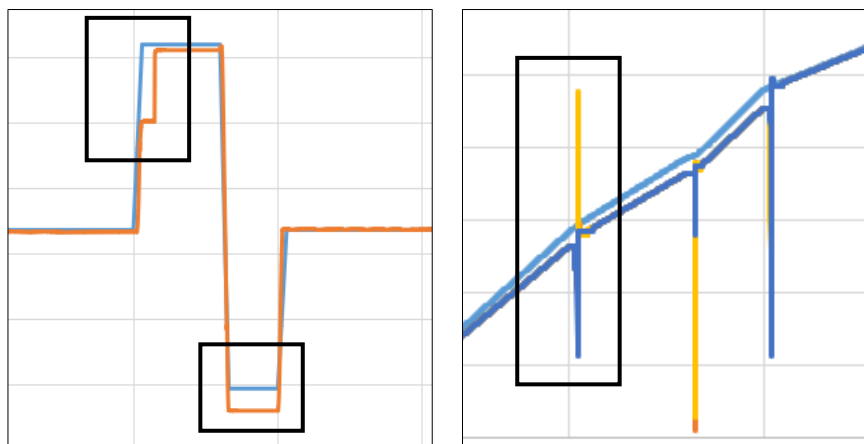
Esta gráfica muestra los mismos resultados que podemos observar en la Figura 108, pero en esta obtenemos desplazamiento en función de fuerza de reacción, en vez de obtener el desplazamiento y la fuerza de reacción en función del tiempo. De esta manera, no se podrá observar en qué momento ha ocurrido el impacto, sino en qué momento del desplazamiento ha ocurrido.

#### 4.3.5. Simulación con reajustes:

Tal y como se puede observar en las figuras obtenidas por simulación dinámica, los resultados que se han obtenido no son iguales en la simulación cinemática, esto significa que hay que rediseñar partes del conjunto del sistema de transmisión, para tratar de acercarnos a los resultados del caso teórico (cinemático). Estas simulaciones se harán a 200 tramas y contacto medio. Podríamos decir que estos parámetros de simulación son la mejor opción en precisión de resultados y tiempo de simulación.

Los reajustes que hemos hecho en el diseño han sido:

- Incrementar el radio de redondeo en todos los salientes de los dientes y en las curvas guía. Este radio se incrementa (como se puede observar tanto en las gráficas del desplazamiento lineal de las horquillas como en las de velocidad angular), para rebajar la intensidad del golpe entre los engranajes móviles y fijos.



**Figura 109.** Colisión entre engranajes fijos y móviles (Fuente: propia)

- Ajustar de forma manual el cabezal de las horquillas a las curvas guía, como consecuencia estarán en contacto directo en todo momento y así no se crean vibraciones (el ejemplo de estas vibraciones se puede observar en la (Figura 109).

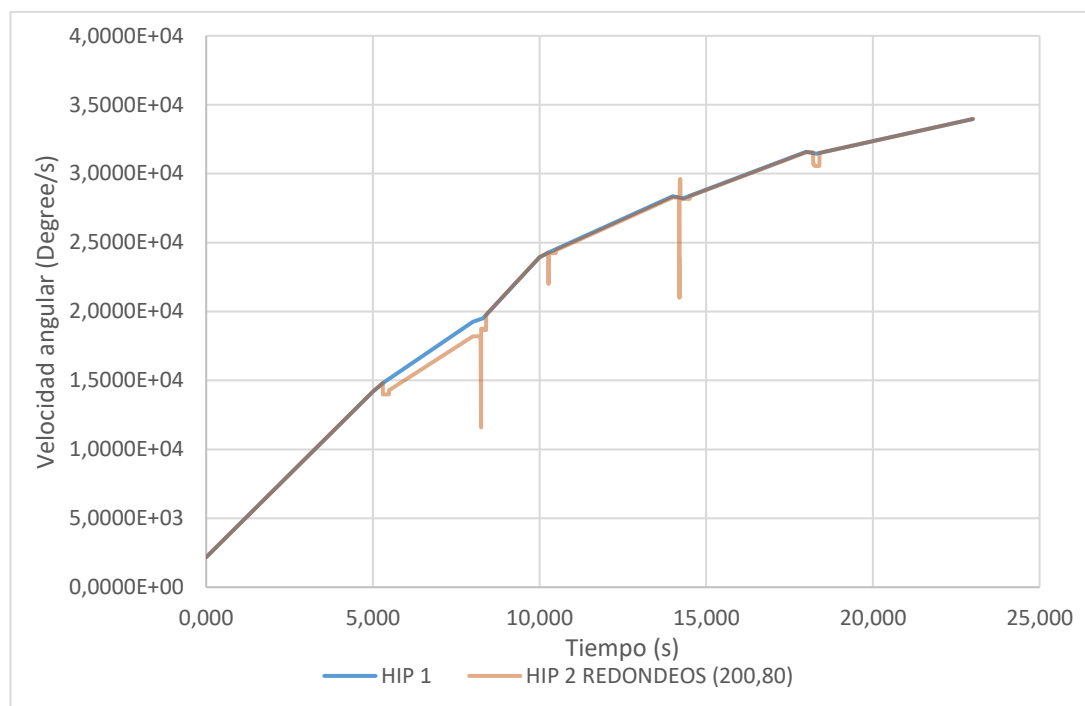
#### 4.3.6. Resultados con reajustes:

##### 4.3.6.1.1 Velocidad angular de salida

##### 4.3.6.1.1.1 Hipótesis 1 frente hipótesis 2 reajustada

A continuación, se mostrarán los resultados graficados de la velocidad angular del eje secundario de la *hipótesis 2 reajustada* contrapuesta a la *hipótesis 1*.



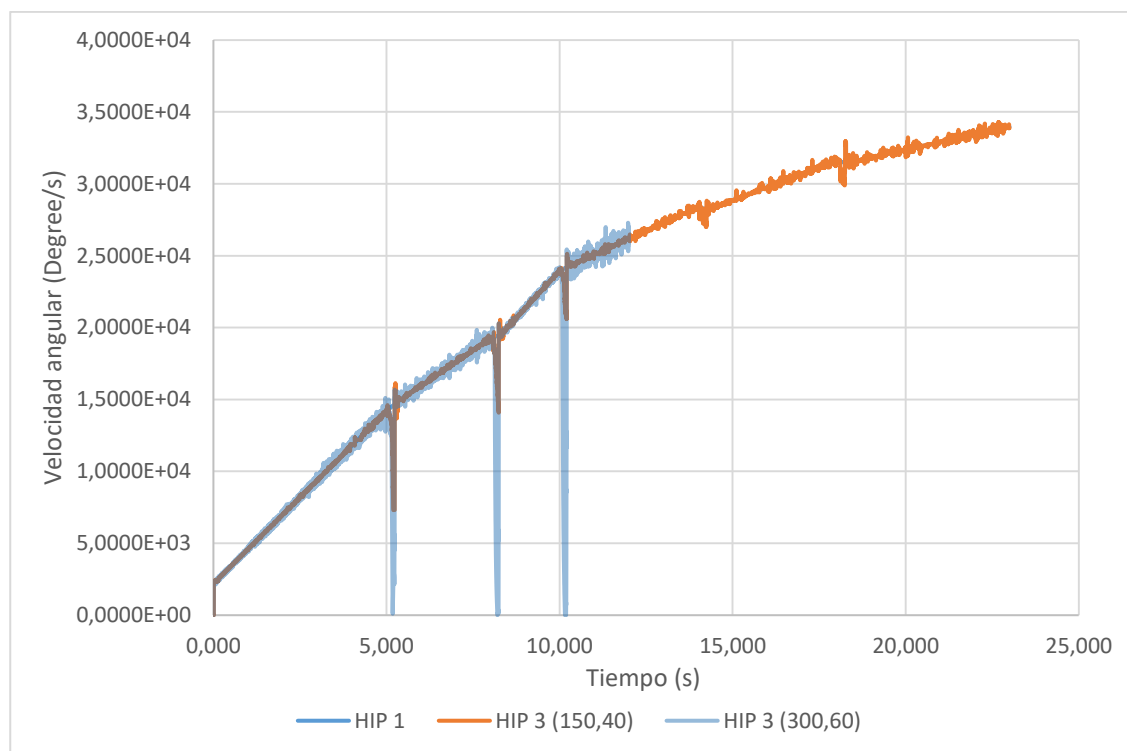


**Gráfica 15.** Velocidad angular del eje secundario en *hipótesis 1* frente a *hipótesis 2 reajustada* (Fuente: propia)

En esta gráfica se puede observar que la intensidad de las colisiones ha disminuido, por este motivo, no se ha perdido energía cinética en el impacto y obtenemos unos resultados muy parecidos a los resultados cinemáticos.

#### 4.3.6.1.1.2 *Hipótesis 1 y 3 frente hipótesis 3 reajustada*

A continuación, se mostrarán los resultados graficados de la velocidad angular del eje secundario de la *hipótesis 3 reajustada* contrapuesta a las *hipótesis 1 y 3*.



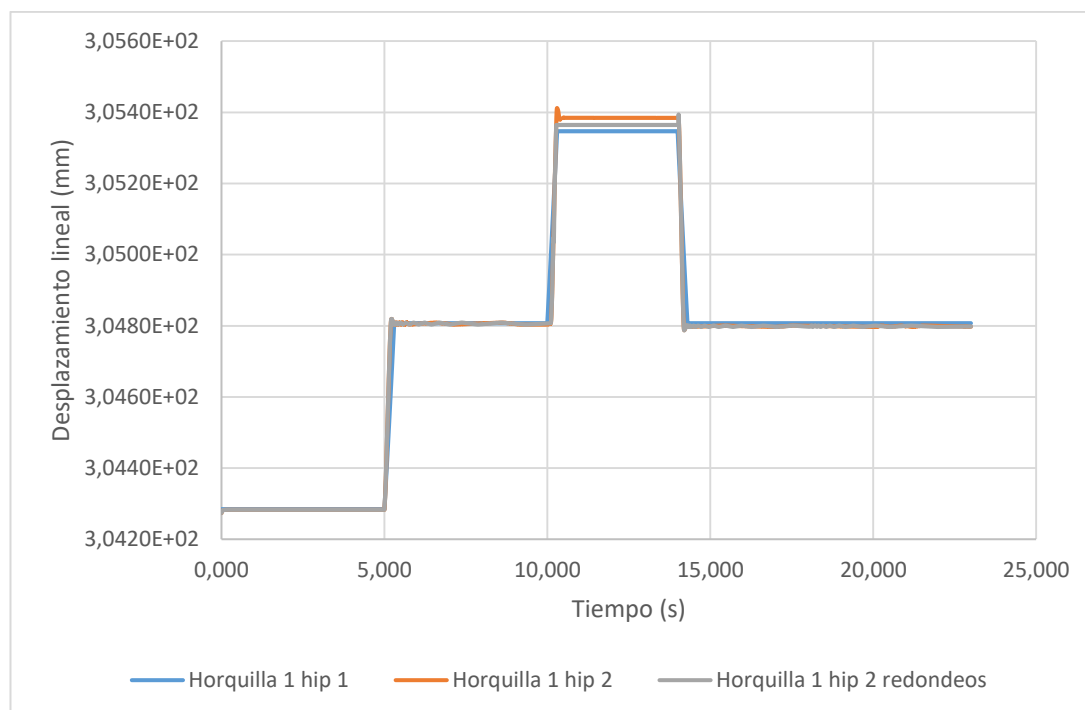
**Gráfica 16.** Velocidad angular del eje secundario en *hipótesis 1 y 3* frente a *hipótesis 3 reajustada* (Fuente: propia)

En esta gráfica se puede observar la disminución de la intensidad de las colisiones entre engranajes fijos y móviles. Además, se aprecia una disminución de la vibración (que se producía entre el cabezal de las horquillas y las curvas guía y repercutía como ruido en la obtención de resultados de la velocidad angular del eje secundario, además de un gasto de energía).

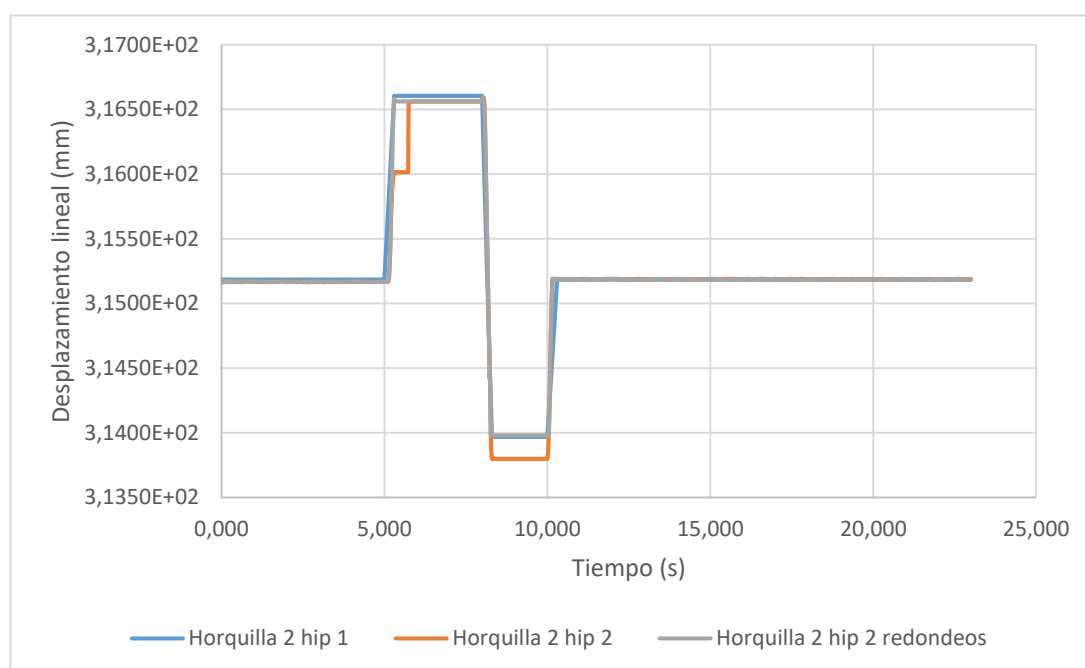
#### 4.3.6.2. Desplazamiento lineal de las horquillas

En las siguientes gráficas se mostrarán los resultados de las *hipótesis 1 y 2* del desplazamiento lineal de las horquillas, contrapuestas a la *hipótesis 2 reajustada*.

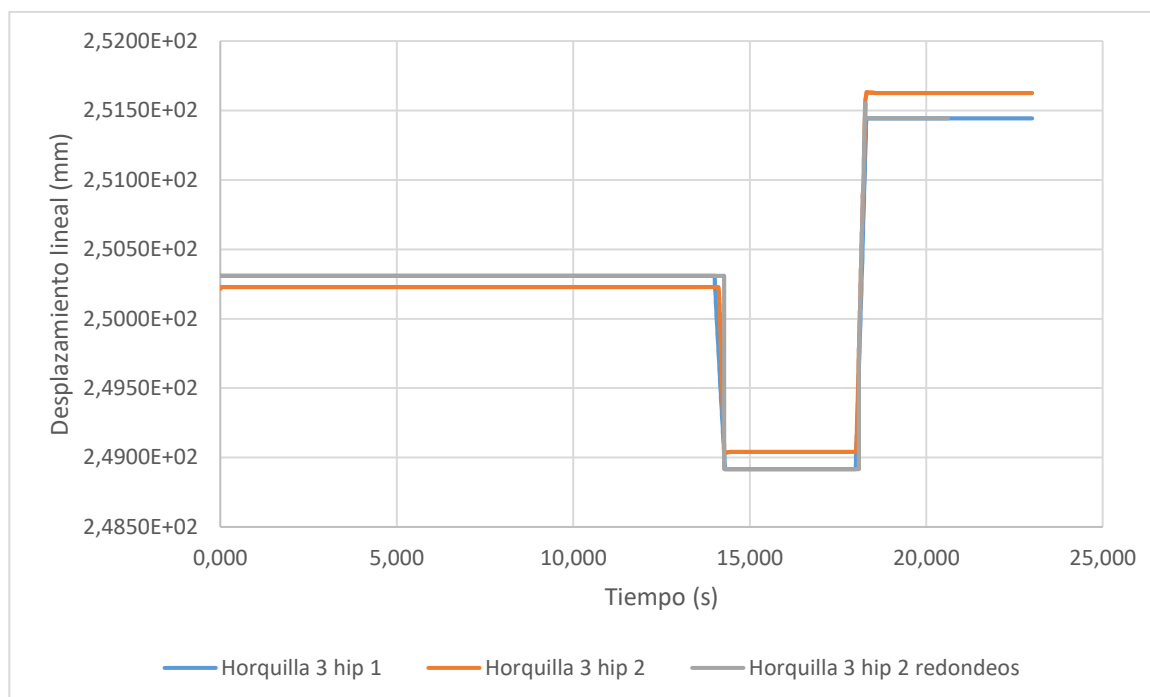
##### 4.3.6.2.1 Hipótesis 1 y 2 contra hipótesis 2 reajustada



**Gráfica 17.** Desplazamiento lineal de la horquilla 1 en hipótesis 1 y 2 frente a hipótesis 2 reajustada (Fuente: propia)



**Gráfica 18.** Desplazamiento lineal de la horquilla 2 en hipótesis 1 y 2 frente a hipótesis 2 reajustada (Fuente: propia)



**Gráfica 19.** Desplazamiento lineal de la *horquilla 3* en *hipótesis 1* y *2* frente a *hipótesis 2 reajustada* (Fuente: propia)

Tal y como se puede observar en las diferentes gráficas, gracias a los reajustes, los valores de desplazamiento de la *hipótesis 2 reajustada* se acercan a la *hipótesis 1*, obteniendo un sistema mejorado.

## 5. Comparativa global de SolidWorks y CATIA V5

### 5.1. Diseño

#### 5.1.1. Creación de variables y tablas de diseño

Tanto en SolidWorks como en CATIA V5, cuando se trabaja con variables y tablas de diseño, se sigue el mismo procedimiento, por lo tanto, podríamos decir que no hay ninguna diferencia en el procedimiento de trabajo.

#### 5.1.2. Definición de ecuaciones

En este apartado, nos encontramos diferencias significativas:

SolidWorks nos permite la creación de funciones, mediante ecuaciones paramétricas, tanto si trabajamos en un croquis 2D o 3D, ya que dispone de herramientas que permiten dibujar dichas funciones directamente, tal y como se observa en el apartado 3.2.1. *Modelaje a partir de tablas de diseño*. Esto ha agilizado y simplificado el modelaje de los dientes de los engranajes.

A diferencia de SolidWorks, que proporciona sus herramientas para la definición de funciones, CATIA V5 sólo permite la creación de funciones de forma directamente si es con la utilización de una macro. Se observa en el apartado 4.2.1.3. *Definición por ley gráfica*.

Por otra parte, si no se dispone de esta macro, el único método para definir una función será de forma indirecta. Tienen que ser previamente definidas a partir de la herramienta *Law* y dibujadas en un *geometrical set*, haciendo uso de la herramienta *Parallel Curve* y de una geometría externa (una línea recta). Otra manera, sería la definición de puntos utilizando la ecuación definida con la herramienta *Law* y posteriormente la unión de estos puntos con la herramienta *spline*. Estos dos procesos se observan en los apartados 4.2.1.3. *Definición por ley gráfica* y 3.2.1. *Modelaje a partir de tablas de diseño* respectivamente.

Podemos concluir que CATIA V5 no dispone de herramientas propias que puedan dibujar una función de forma directa, en cambio, en SolidWorks sí que es posible.

#### 5.1.3. Diseño a partir de un entorno previamente definido

En este apartado no se encuentran diferencias en el procedimiento de trabajo entre ambos programas.

## 5.2. Simulación

### 5.2.1. Método de trabajo

La diferencia más destacable entre ambos programas reside en que CATIA V5 tiene un módulo para *Assembly Design* y otro para *DMU Kinematics*, impidiendo que las relaciones de posición geométrica se puedan relacionar en ambos módulos. En cambio, SolidWorks dispone también de dos módulos (mencionados anteriormente), pero ambos comparten las mismas relaciones de posición. Esto se ve reflejado en que, si CATIA V5 tuviese definido un ensamblaje en *Assembly Design* previo a la simulación, para poder simular, se deberían cambiar todas las relaciones de posición del *Assembly Design* a juntas cinemáticas. En cambio, si esto pasase SolidWorks y ya viniese definido un ensamblaje previo a la simulación, se podría simular sin ningún problema.

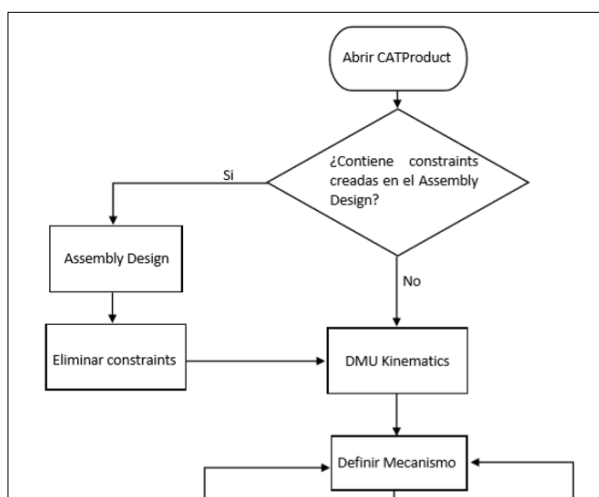


Figura 110. CATIA V5 (Fuente: propia)

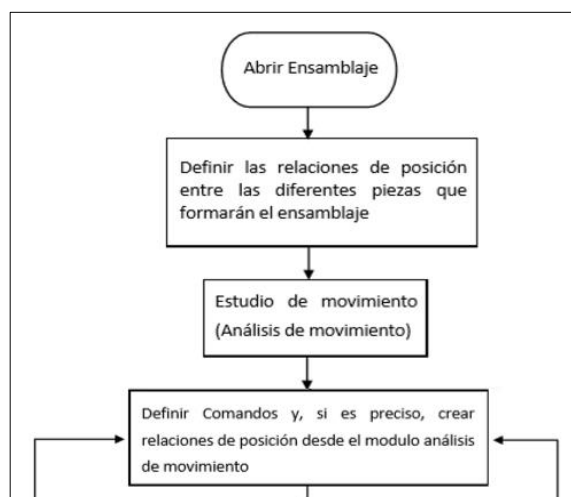


Figura 111. SolidWorks (Fuente: propia)

### 5.2.2. Definición de relaciones de posición/mecanismo

Cada programa tiene su propio método y herramientas para definir las relaciones de posición entre las diferentes piezas (dentro del ensamblaje). La diferencia más destacable consiste en que CATIA V5 precisa tener 0 grados de libertad para poder mover el mecanismo, en cambio, SolidWorks sin tener restringidos todos los grados de libertad permite visualizar un movimiento que, aunque no sea el ideal, pauta las posibles restricciones que pueden faltar para acabar de definir el mecanismo.

### 5.2.3. Creación de comandos

CATIA V5 solo permite la creación de dos tipos de comando: *angle driven* o *length driven*. Para definir estos comandos, sólo se pueden utilizar valores de desplazamiento lineal o desplazamiento angular.

En el caso de que se tenga un input de velocidad o aceleración para simular, estos tendrán que ser pasados a desplazamiento de forma manual. Este procedimiento conlleva al uso de herramientas externas al programa. Este problema se observa en el apartado 4.2.1.2 *Definición de comandos mediante leyes*.

En SolidWorks los motores pueden ser definidos a partir de valores de: desplazamiento, velocidad o aceleración; de forma directa. Todo esto se puede apreciar en el apartado 4.3.2 *Definición de comandos*.

#### 5.2.4. Definición de comandos

CATIA V5 permite definir un comando a partir de una ley explícita (expresión matemática) o por ley gráfica, esta última se dividirá según su creación:

- forma manual (segmentos).
- macro de Excel cedida por Dassault Systèmes (definición por puntos).
- expresión matemática, precisa de herramientas intermedias (como, por ejemplo: *Law* y *Parallel Curve*).

Esto se puede apreciar en el apartado 4.2.1.2 *Definición de comandos mediante leyes*.

SolidWorks permite definir comandos directamente a partir de:

- forma manual (segmentos).
- definición por puntos (importando datos desde Excel, sin la necesidad de una macro externa).
- expresión matemática.

Como podemos observar en el apartado 4.3.2 *Definición de comandos*.

Podemos concluir que CATIA V5 en gran parte de los métodos para definir comandos, precisa de pasos intermedios (ya se el uso de un programa externo o herramienta propia). En cambio, SolidWorks ya proporciona las herramientas necesarias para poder definir los comandos de forma directa.

#### 5.2.5. Ejecución de la simulación

CATIA V5 sólo permite realizar una simulación cinemática, ya que las únicas relaciones de posición con las que se ha podido definir el ensamblaje, son relaciones cinemáticas.

SolidWorks no sólo permite el uso de las mismas relaciones cinemáticas, sino que, permite integrar relaciones dinámicas, para poder obtener tanto una simulación cinemática como una dinámica. Véase en la hipótesis 1, 2 y 3 dentro del apartado 4.3.2. *Definición de comandos*.

### 5.2.6. Extracción de resultados

En CATIA V5 se pueden extraer sólo resultados de magnitudes cinemáticas, rutas de trazo y envolventes de volumen. La extracción de los resultados se ejecuta de una manera directa y sencilla.

Aunque en SolidWorks se puedan extraer resultados de magnitudes cinemáticas, rutas de trazo y magnitudes dinámicas; no dispone de la herramienta para extraer resultados de envolventes de volumen. Por otra parte, la importación de una ruta de trazo a una pieza requiere de programas externos y de herramientas propias.

## 5.3. Económica

En este apartado se muestra el precio de las licencias actuales extraídas de las páginas web oficiales de ambos softwares (8) (9).

**Tabla 4.** Comparativa en precio de licencias (Fuente: propia)

	<b>Compra</b>	<b>Mantenimiento anual</b>	<b>Alquiler anual</b>
<b>SolidWorks Premium</b>	10.950,00 €	2.250,00 €	5.600,00 €
<b>CATIA V5 con licencia DMU Kinematics</b>	63.280,00 €	11.110,00 €	36.390,00 €

Recalcar, que en el ámbito académico, ambos programas ceden licencias de bajo coste o gratuitas para estudiantes.



## 6. Conclusiones

En ambos programas hemos podido obtener el mismo resultado de diseño, procediendo de maneras muy parecidas. Se observa que con el programa SolidWorks, se ha podido llegar al mismo resultado de una manera más sencilla y rápida, gracias a poder definir funciones de forma directa.

A nivel de simulación, se destaca que SolidWorks va un paso más adelante, ya que puede realizar simulaciones dinámicas. También, refiriéndonos al cómputo de herramientas para la definición de las simulaciones, se observa que SolidWorks nos facilita el proceso de simular, ya que dispone de herramientas que nos permiten definir reacciones y comandos de forma directa sin tener que pasar de un módulo a otro, a programas externos o más herramientas propias del programa. Aunque en SolidWorks las simulaciones dinámicas puedan conllevar un elevado tiempo de cálculo en la simulación, se pueden extraer resultados útiles y precisos.

A nivel de cinemática, podríamos llegar a concluir que ambos programas nos otorgan las mismas características

La extracción de resultados en CATIA V5 (tal y como se ha mencionado en la comparativa de los dos programas) solo puede extraer resultados cinemáticos, rutas de trazo y envolventes de volumen. Estos datos se extraen con mucha facilidad. Por otra parte, SolidWorks, aunque pueda extraer más resultados que CATIA V5 (ya que dispone de una simulación dinámica) en algunos puntos la extracción de estos se vuelve complicada.

Respecto al ámbito económico de ambos softwares, se puede observar en la tabla 4, la extensa diferencia de precios entre ambos programas. El trabajo que se ha realizado en nuestro proyecto, ha sido únicamente la modelización y simulación de piezas (sin necesitar de bases de datos, soportes técnicos, etc... , que proporcionan estos programas CAD), por tanto, de manera subjetiva, podríamos decir, que SolidWorks debido a que constituye la opción de menor coste sería la mejor opción como programa de modelaje y simulación.

## 7. Análisis del impacto medioambiental

El impacto medioambiental se puede cuantificar como un proyecto que no ha generado altas cantidades de residuos. La gran mayoría del impacto medioambiental reside en el consumo eléctrico de la herramienta informática utilizada en este proyecto. El ordenador utilizado tiene una potencia de 0,12 kW. Las horas trabajadas con esta herramienta son 700 h.

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = \text{Potencia (kW)} \cdot \text{Tiempo de uso (h)} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

$$\text{Consumo eléctrico (kWh)} = 0,12 \text{ kW} \cdot 700 \text{ h} = 84 \text{ kWh} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

Si se considera el factor de emisión asociado a la energía eléctrica del año 2017 como válido (6), se obtiene la siguiente información:

**Tabla 5.** Liberación de residuos (Fuente: propia)

Herramienta informática	Factor de emisión (masa de CO <sub>2</sub> liberada por potencia hora)	Consumo eléctrico	Impacto medioambiental (masa de CO <sub>2</sub> liberada)
Ordenador	0,392 kg CO <sub>2</sub> / kWh	0,72 kWh/persona	0,28 kg CO <sub>2</sub> / persona

También, tenemos que considerar como inconveniente del impacto medioambiental los riesgos de salud asociados a este. Como bien se sabe, pasar horas frente una pantalla de ordenador es perjudicial para la salud, incluyendo los riesgos más destacados como son: problemas posturales, de visión y dolores de cabeza.

## 8. Análisis económico

El análisis de coste de la realización de este proyecto se puede desglosar en tres apartados distintos: costes de personal, costes de hardware y costes de software.

### 8.1. Costes de personal

Todas las horas realizadas corresponden a un trabajo de ingeniero consultor, el cual tiene un sueldo medio de aproximadamente 16 euros/h. El coste que se tiene que aportar a la seguridad social es del 33%.

**Tabla 6.** Coste personal (Fuente: propia)

	Horas	Coste por hora	Coste
Ingeniero (€)	700 h	16,00 €/h	11.200,00 €
Seguridad social		5,28 €/h	3.696,00 €
Total (€)			14.896,00 €

### 8.2. Costes de hardware

Para la realización de este trabajo han sido necesarias la utilización de herramientas informáticas. En este caso, se ha utilizado un ordenador de uso utilitario, se le estima una vida útil de 5 años. Para calcular estos costes hay que aproximar las horas de uso del ordenador en 1 año, en este caso, se aproxima a 22 días útiles trabajados por mes y 8 horas trabajadas por día útil, esto se traduce a 1936 horas por año trabajado. En 5 años se obtendría un total de 9.680 horas trabajadas. El coste de la herramienta informática (ordenador) con IVA general es de 960,00 euros. El total de horas trabajadas con esta herramienta han sido 700 horas. El coste de estas horas respecto la amortización a 5 años nos supone unos gastos de hardware de 69,42 euros.

**Tabla 7.** Coste de hardware (Fuente: propia)

Herramienta informática	Horas	Coste unitario + IVA general	Amortización	Coste
Ordenador	700 h	960,00 €	9.680 h	69,42 €

### 8.3. Costes de software

Los costes de software consisten en el sumatorio de licencia y formación. Este lo haremos en base al pago efectuado a las entidades académicas para poder hacer uso de sus respectivos softwares y formación. La Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) cedió la licencia para SolidWorks Premium Student, por otra parte, la entidad privada Fundació CIM cedió la licencia de CATIA V5, que contenía los módulos en específico Part Design, GSD, Assembly Desing y DMU Kinematics.

**Tabla 8.** Coste de software (Fuente: propia)

Entidad académica	Software	Formación + Licencia	Coste/crédito	Coste
UPC	SolidWorks	12 créditos	39,53 €/ects	474,36 €
Fundació CIM	CATIA V5	15 créditos	194,00 €/ects	2910,00 €
<b>Total (€)</b>				<b>3.384,36 €</b>

### 8.4. Otros costes

Tenemos que tener en cuenta el consumo energético del hardware. El coste del kWh utilizado es proporcionado por la empresa Endesa en su portal web (7). El cálculo para la energía consumida se encuentra en la (Ec.7.1).

**Tabla 9.** Coste energético (Fuente: propia)

	Consumo eléctrico	Coste/kWh	Coste
Energía	84 kWh	0,140439 €/kWh	11,80 €
IVA general (21%)			2,48 €
Total (€)			14,24 €

## Bibliografia

1. Sergio Gómez González. *El gran libro de SolidWorks*. 2014. ISBN 9788426721730.
2. Eduardo Torrecilla Insagurbe. *El gran libro de CATIA*. 2010. ISBN 9788426716637.
3. López Martínez, Juan Antonio; Villar Ribera, Ricardo; López Membrilla, Manuel; Font Andreu, Jorge. *Síntesis de mecanismos con herramientas CAX*.
4. Entidad privada Fundació CIM. Apuntes sobre CATIA V5 y DMU Kinematics.
5. UPC. Apuntes de las asignaturas: Validación de diseño y ampliación de expresión gráfica.
6. Generalitat de Catalunya. Factor de emisión asociado a la energía eléctrica: el mix eléctrico. A: [en línea]. 2018. Disponible a: [http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduceix\\_emissions/com-calcular-emissions-de-geh/factors\\_demissio\\_associats\\_a\\_lenergia/](http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduceix_emissions/com-calcular-emissions-de-geh/factors_demissio_associats_a_lenergia/).
7. Endesa. A: [en línea]. [Consulta: 14 maig 2018]. Disponible a: <https://www.endesa.com/es.html>.
8. Dassault Systèmes. <http://www.solidworks.es/sw/purchase/sw-quote.htm>
9. Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/es/comprar/solicitar-un-presupuesto/>
10. Dassault Systèmes. CosmosMotion. <http://www.solidworks.com>

## Anejo A

### A1. Resultados velocidad angular CATIA V5

**Tabla 10.** Tabla de diseño para los Engranaje\_1(1), Engranaje\_2(1), Engranaje\_5(1) y Engranaje\_6(1 )  
(Fuente: propia)

Time	Commands Value	primario.2\Angular	na1(2)\Angula	ia2(2)\Angula	ia3(2)\Angula	ia4(2)\Angula	ia5(2)\Angula	ia6.2\Angular
0	6079,03;0;0;0;0;0;0;0;2182,77	364,432	347,236	445,45	574,214	636,036	364,432	364,432
0,115	6792,32;0;0;0;0;0;0;0;2449,44	409,515	396,263	508,344	655,289	725,84	409,515	409,515
0,23	7602,05;0;0;0;0;0;0;0;2747,91	455,613	446,519	572,815	738,397	817,896	455,613	455,613
0,345	8508,45;0;0;0;0;0;0;0;3078,19	501,723	496,86	637,395	821,645	910,106	501,723	501,723
0,46	9511,59;0;0;0;0;0;0;0;3440,29	547,841	547,188	701,958	904,871	1002,29	547,841	547,841
0,575	10611,3;0;0;0;0;0;0;0;3834,21	593,962	597,365	766,327	987,847	1094,2	593,962	593,962
0,69	11807,2;0;0;0;0;0;0;0;4259,95	640,08	647,21	830,271	1070,27	1185,5	640,08	640,08
0,805	13098,4;0;0;0;0;0;0;0;4717,52	686,189	696,501	893,503	1151,79	1275,79	686,189	686,189
0,92	14483,5;0;0;0;0;0;0;0;5206,89	732,278	744,971	955,682	1231,94	1364,57	732,278	732,278
1,035	15960,7;0;0;0;0;0;0;0;5728,06	778,339	792,307	1016,41	1310,22	1451,28	778,339	778,339
1,15	17527,6;0;0;0;0;0;0;0;6280,99	824,362	838,18	1075,26	1386,08	1535,31	824,362	824,362
1,265	19181,0;0;0;0;0;0;0;0;6865,66	870,338	882,368	1131,94	1459,15	1616,25	870,338	870,338
1,38	20917,6;0;0;0;0;0;0;0;7482,05	916,268	924,827	1186,41	1529,36	1694,02	916,268	916,268
1,495	22734,3;0;0;0;0;0;0;0;8130,1	962,155	965,7	1238,84	1596,95	1768,89	962,155	962,155
1,61	24628,2;0;0;0;0;0;0;0;8809,81	1008,01	1005,32	1289,67	1662,47	1841,45	1008,01	1008,01
1,725	26597,5;0;0;0;0;0;0;0;9521,15	1053,84	1044,2	1339,55	1726,77	1912,68	1053,84	1053,84
1,84	28641,3;0;0;0;0;0;0;0;10264,1	1099,68	1083,08	1389,43	1791,06	1983,9	1099,68	1099,68
1,955	30760,6;0;0;0;0;0;0;0;11038,7	1145,54	1122,88	1440,48	1856,87	2056,79	1145,54	1145,54
2,07	32958,1;0;0;0;0;0;0;0;11845	1191,45	1164,72	1494,15	1926,06	2133,43	1191,45	1191,45
2,185	35238,9;0;0;0;0;0;0;0;12682,9	1237,45	1209,78	1551,96	2000,57	2215,96	1237,45	1237,45
2,3	37610,1;0;0;0;0;0;0;0;13552,7	1283,55	1258,85	1614,91	2081,73	2305,86	1283,55	1283,55
2,415	40079,8;0;0;0;0;0;0;0;14454,3	1329,77	1312,25	1683,41	2170,03	2403,67	1329,77	1329,77
2,53	42656,1;0;0;0;0;0;0;0;15387,8	1376,09	1369,76	1757,2	2265,14	2509,02	1376,09	1376,09
2,645	45346,3;0;0;0;0;0;0;0;16353,3	1422,49	1430,65	1835,31	2365,83	2620,54	1422,49	1422,49
2,76	48155,7;0;0;0;0;0;0;0;17350,8	1468,93	1493,59	1916,04	2469,91	2735,83	1468,93	1468,93
2,875	51086,6;0;0;0;0;0;0;0;18380,4	1515,37	1556,63	1996,92	2574,16	2851,31	1515,37	1515,37
2,99	54136,6;0;0;0;0;0;0;0;19442	1561,73	1617,19	2074,6	2674,3	2962,22	1561,73	1561,73
3,105	57298,1;0;0;0;0;0;0;0;20535,6	1607,95	1672,02	2144,94	2764,97	3062,66	1607,95	1607,95
3,22	60557,0;0;0;0;0;0;0;0;21660,9	1653,96	1718,1	2204,05	2841,17	3147,06	1653,96	1653,96
3,335	63894,5;0;0;0;0;0;0;0;22818	1699,71	1753,7	2249,73	2900,05	3212,28	1699,71	1699,71
3,45	67290,0;0;0;0;0;0;0;0;24006,5	1745,2	1778,6	2281,67	2941,23	3257,89	1745,2	1745,2
3,565	70724,0;0;0;0;0;0;0;0;25226,3	1790,48	1794,14	2301,6	2966,92	3286,35	1790,48	1790,48
3,68	74181,1;0;0;0;0;0;0;0;26477,3	1835,61	1803,2	2313,23	2981,91	3302,95	1835,61	1835,61
3,795	77652,8;0;0;0;0;0;0;0;27759,4	1880,71	1810,24	2322,25	2993,54	3315,84	1880,71	1880,71
3,91	81140,7;0;0;0;0;0;0;0;29072,7	1925,91	1821,2	2336,31	3011,67	3335,91	1925,91	1925,91
4,025	84659,4;0;0;0;0;0;0;0;30417,3	1971,4	1843,59	2365,04	3048,7	3376,93	1971,4	1971,4
4,14	88238,9;0;0;0;0;0;0;0;31793,4	2017,38	1885,93	2419,36	3118,72	3454,49	2017,38	2017,38
4,255	91923,9;0;0;0;0;0;0;0;33201,4	2063,98	1953,78	2506,4	3230,92	3578,77	2063,98	2063,98
4,37	95764,2;0;0;0;0;0;0;0;34641,8	2111,16	2047,14	2626,17	3385,3	3749,78	2111,16	2111,16

4,715	108551;0;0;0;0;0;0;0;0;39159,6	2253,62	2381,59	3055,21	3938,38	4362,39	2253,62	2253,62
4,83	113193;0;0;0;0;0;0;0;0;40730,6	2299,79	2438,43	3128,12	4032,36	4466,5	2299,79	2299,79
4,945	117869;0;0;0;0;0;0;0;0;42332,9	2344,1	2410,55	3092,36	3986,26	4415,43	2344,1	2344,1
5,06	22376;-1;0;1;-8,6;1;1;0;43964,	2385,61	2258,36	2897,13	3734,59	4136,67	2385,61	2385,61
5,175	0;2,91667;-25,0833;2,91667;2	2425,31	2047,89	2627,13	3386,55	3751,15	2425,31	2425,31
5,29	0;4,83333;-41,5667;4,83333;4	2464,93	1845,88	2367,98	3052,49	3381,13	2464,93	2464,93
5,405	33710;-5;0;5;-43;5;5;0;49024,	2499,22	1790,05	2296,35	2960,15	3278,85	2499,22	2499,22
5,52	137182;-5;0;5;-43;5;5;0;50760	2530,03	1833,36	2351,91	3031,77	3358,19	2530,03	2530,03
5,635	40773;-5;0;5;-43;5;5;0;52516,	2559,98	1904,33	2442,96	3149,14	3488,18	2559,98	2559,98
5,75	144490;-5;0;5;-43;5;5;0;54293	2590,62	1958,88	2512,94	3239,35	3588,11	2590,62	2590,62
5,865	48280;-5;0;5;-43;5;5;0;56091,	2622,42	1980,91	2541,21	3275,79	3628,47	2622,42	2622,42
5,98	152089;-5;0;5;-43;5;5;0;57912	2654,83	1980,87	2541,15	3275,72	3628,39	2654,83	2654,83
6,095	155890;-5;0;5;-43;5;5;0;59755	2687,16	1976,26	2535,24	3268,09	3619,95	2687,16	2687,16
6,21	59689;-5;0;5;-43;5;5;0;61620,	2718,99	1979,02	2538,78	3272,66	3625,01	2718,99	2718,99
6,325	63505;-5;0;5;-43;5;5;0;63507,	2750,28	1994,95	2559,22	3299	3654,18	2750,28	2750,28
6,44	67364;-5;0;5;-43;5;5;0;65415,	2781,28	2023,78	2596,19	3346,67	3706,98	2781,28	2781,28
6,555	71287;-5;0;5;-43;5;5;0;67345,	2812,48	2060,56	2643,38	3407,5	3774,36	2812,48	2812,48
6,67	75285;-5;0;5;-43;5;5;0;69296,	2844,18	2099,84	2693,76	3472,44	3846,3	2844,18	2844,18
6,785	79356;-5;0;5;-43;5;5;0;71270,	2876,37	2136,91	2741,33	3533,75	3914,21	2876,37	2876,37
6,9	83494;-5;0;5;-43;5;5;0;73266,	2908,78	2167,92	2781,1	3585,03	3971	2908,78	2908,78
7,015	87682;-5;0;5;-43;5;5;0;75284,	2940,84	2189,91	2809,32	3621,4	4011,29	2940,84	2940,84
7,13	91903;-5;0;5;-43;5;5;0;77324,	2971,98	2201,9	2824,7	3641,23	4033,26	2971,98	2971,98
7,245	96140;-5;0;5;-43;5;5;0;79385,	3002,14	2206,31	2830,35	3648,51	4041,33	3002,14	3002,14
7,36	100382;-5;0;5;-43;5;5;0;81467,	3031,78	2209,17	2834,02	3653,24	4046,57	3031,78	3031,78
7,475	104635;-5;0;5;-43;5;5;0;83569,	3061,92	2220,15	2848,1	3671,4	4066,67	3061,92	3061,92
7,59	108927;-5;0;5;-43;5;5;0;85693,	3093,93	2251,01	2887,7	3722,44	4123,21	3093,93	3093,93
7,705	113301;-5;0;5;-43;5;5;0;87839,	3128,19	2303,61	2955,18	3809,42	4219,55	3128,19	3128,19
7,82	117784;-5;0;5;-43;5;5;0;90010,	3162,96	2360,09	3027,63	3902,81	4323	3162,96	3162,96
7,935	122349;-5;0;5;-43;5;5;0;92203,	3194,4	2380,97	3054,42	3937,35	4361,25	3194,4	3194,4
8,05	0;3,41667;-54,6667;5;3,41667	3216,58	2307,04	2959,57	3815,09	4225,83	3216,58	3216,58
8,165	8;-5;0;-0,225;-81,5;5;-0,225;0,9	3232,65	2165,93	2778,55	3581,74	3967,37	3232,65	3232,65
8,28	0;-3,86667;-108,333;5;-3,86667	3248,95	2028,09	2601,73	3353,8	3714,88	3248,95	3248,95
8,395	052;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;101	3289,41	2011,13	2579,96	3325,75	3683,81	3289,41	3289,41
8,51	961;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;103	3343,05	2060,31	2643,06	3407,08	3773,9	3343,05	3343,05
8,625	965;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;105	3395,33	2102,83	2697,6	3477,39	3851,78	3395,33	3395,33
8,74	029;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;108	3443,54	2124,63	2725,57	3513,44	3891,71	3443,54	3443,54
8,855	129;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;110	3491,21	2143,51	2749,79	3544,66	3926,29	3491,21	3491,21
8,97	272;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;112	3540,55	2170,86	2784,88	3589,89	3976,39	3540,55	3540,55
9,085	477;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;115	3591,55	2206,76	2830,93	3649,26	4042,16	3591,55	3591,55
9,2	755;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;117	3642,99	2245,19	2880,23	3712,81	4112,55	3642,99	3642,99
9,315	104;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;120	3693,83	2280,57	2925,62	3771,32	4177,35	3693,83	3693,83
9,43	515;-5;0;-4,5;-113;5;-4,5;0;122	3743,31	2308,79	2961,83	3817,99	4229,05	3743,31	3743,31

## A2. Tablas de diseño

- Tabla de diseño para los Engranaje\_1(1), Engranaje\_2(1), Engranaje\_5(1) y Engranaje\_6(1).

**Tabla 11.** Tabla de diseño para los Engranaje\_1(1), Engranaje\_2(1), Engranaje\_5(1) y Engranaje\_6(1 )  
(Fuente: propia)

Engranaje	z	Dp	m	Di	De	Db
Engranaje_1(1)	14	36,98	2,64	30,37	42,26	31,69
Engranaje_2(1)	19	45,86	2,41	39,82	50,68	41,03
Engranaje_5(1)	23	59,62	2,59	53,14	64,81	54,44
Engranaje_6(1)	24	63,39	2,64	56,79	68,67	58,11





Pc	Corte diente int (mm)	Corte diente ext (mm)	Angulo corte diente int (deg)	Grosor diente (mm)	Grosor cuerpo engranaje (mm)
2,64	18,25	18,25	24	19	19
2,41	23	23	24	15	15
2,59	30,5	30,5	24	15	15
2,64	32,25	32,25	24	15	15

Angulo corte diente ext (deg)	Radio hend. Sup. (mm)	Radio hend inf (mm)	Profundidad hend (mm)	Long saliente (mm)
24	14,75	11,75	5	0
24	14,6	12,6	5	0
24	23	18,5	5	5
24	22,25	18,5	5	5

Ancho saliente sup. (mm)	Ancho saliente Inf. (mm)	Nº salientes	Angulo saliente medio (deg)
0	0	0	0
0	0	0	0
7	5	6	10
7	5	6	10

Saliente	Sketch saliente 1	pad saliente 1	matriz saliente 1	Sketch saliente 2
false	false	false	false	false
false	false	false	false	false
true	true	true	true	true
true	true	true	true	true

pad saliente 2	matriz saliente 2	Sketch pocket saliente	pocket saliente	matriz pocket saliente
false	false	false	false	false
false	false	false	false	false
true	true	true	true	true
true	true	true	true	true

R hend ENG1y2	R hend ENG5y6	R saliente ENG5	R Saliente ENG6	Hend. Ensamble 1	Hend ensamble 2
true	false	false	false	false	false
true	false	false	false	false	false
false	true	true	false	true	true
false	true	false	true	true	true

- Tabla de diseño para los Engranaje\_3(1) y Engranaje\_4(1)

Tabla 12. Tabla de diseño para los Engranaje\_3(1) y Engranaje\_4(1)

Engranaje	z	Dp	m	Di	De	Db
Engranaje_3(1)	21	51,58	2,45	45,43	56,491	46,66
Engranaje_4(1)	24	56	2,33	50,16	60,6	51,33

Grosor diente (mm)	corte diente int (mm)	Angulo corte diente Int (deg)	Corte diente ext (mm)	Angulo corte diente ext (deg)	Grosor cuerpo (mm)
15	22,3	24	26,9	40	15
15	24,5	24	28,5	40	15

Altura saliente1 sup (mm)	Altura saliente1 Inf (mm)	Longitud saliente1 (mm)	Ancho saliente1 sup (mm)	Ancho saliente1 inf (mm)
23,9	16,3	5	7	5
23,5	16,8	5	7	5

- Tabla de diseño para los Engranaje\_1(2), Engranaje\_2(2), Engranaje\_3(2) y Engranaje\_4(2).

**Tabla 13.** Tabla de diseño para los Engranaje\_1(2), Engranaje\_2(2), Engranaje\_5(1) y Engranaje\_3(2 ) y Engranaje\_4(2 ) (Fuente: propia)

Eje secundario	z	m	Dp	Di	De	Pc
Engranaje_1(2)	39	2,64	103,02	96,42	108,30	8,30
Engranaje_2(2)	39	2,41	94,14	88,10	98,97	7,58
Engranaje_3(2)	36	2,46	88,42	82,28	93,33	7,72
Engranaje_4(2)	36	2,33	84,00	78,17	88,67	7,33

Corte diente Inf (mm)	Corte diente Ext (mm)	Angulo corte diente Int (deg)	Angulo corte diente Ext (deg)	Grosor diente (mm)
51,25	51,25	25	25	14
46,75	46,75	25	25	13
43	43	40	40	15
41,75	41,75	25	25	15

Hend Curva Sup (mm)	Hend Curva Inf (mm)	R hend Curva (mm)	Hend1 Inf (mm)	Hend1 Sup (mm)
43,25	42,25	5	19,75	41,25
39,75	37,75	5	19,75	36,75
35,25	33,25	5	19,75	32,25
32,75	30,75	5	19,75	30,75

Ancho Hend1 Sup (mm)	Ancho Hend1 Inf (mm)	Grosor hend1 (mm)	Nº_Hend1	Altura saliente1 Sup (mm)	Grosor saliente1 (mm)
35	17	5	6	19,75	2
31	17	5	6	19,75	2
29	17	5	6	19,75	4
27	17	5	6	19,75	4

- Tabla de diseño para los Engranaje\_5(2) y Engranaje\_6(2)

**Tabla 13.** Tabla de diseño para los Engranaje\_5(2) y Engranaje\_6(2)

Eje secundario	z	m	Dp	Di	De	Pc
Engranaje_5(2)	31	2,59	80,37	73,89	85,56	8,14
Engranaje_6(2)	29	2,64	76,60	70,00	81,89	8,30

Corte diente Inf (mm)	Corte diente Ext (mm)	Angulo corte diente Int (deg)	Angulo corte diente Ext (deg)	Grosor diente (mm)
41,75	41,75	24	41,75	15
36,5	39,25	60	36,5	14

Altura hend Sup (mm)	Profundidad hend (mm)		Altura saliente sup (mm)	Altura saliente Inf (mm)	Longitud saliente (mm)
32,75	5		33,75	24,75	4,7
30,25	5		31,25	22,25	7
Longitud2 salinete2 (mm)	Ancho saliente3 sup (mm)	Ancho saliente3 inf (mm)	Altura saliente3 inf (mm)	Longitud saliente3 inf (mm)	Nºsalientes3
2	14	11	20,25	7	6
2	14	11	20,25	5	6

Ancho saliente Sup (mm)	Ancho saliente Inf (mm)	Nº salientes
11	8	6

11	8	6
----	---	---

- **Tabla de diseño para las horquillas**

**Tabla 14.** Tabla de diseño para las horquillas

Horquillas	Elipse horizontal (mm)	Elipse vertical (mm)	Ancho elipse (mm)	Altura elipse (mm)	R cabezal Ext (mm)
1	37	24	4,25	14	11,5
2	40,5	31,4	6	19	11,5

Altura cabezal (mm)	Grosor cuerpo (mm)	R cabezal2 ext (mm)	R cabezal2 int (mm)	Longitud cabezal media (mm)	Longitud cabezal media2 (mm)
55,5	4	9,7	7,7	12	12
70	4	9,7	7,7	7	16

Altura nervio (mm)	Ancho nervio base (mm)	Angulo saliente cabezal (deg)	Altura saliente (mm)	Ancho saliente sup (mm)	R saliente (mm)	Distancia saliente (mm)
14	5	45	7	2	3	0
16	5	45	7	2,5	3	0

### A3. Inputs para la simulación cinemática en CATIA V5

**Tabla 15.** Desplazamiento angular para el eje primario y secundario

Gear	Time	Inc. Time	Degree entrada	Degree salida
1	0	0	6079,027356	2182,774634
	1	1	15501,51976	5566,075317
	2	2	31610,94225	11350,4281
	3	3	54407,29483	19535,83297
	4	4	83890,57751	30122,28995
	5	5	120060,7903	43109,79902
1 a 2	5,075	0,075	122938,8298	44179,7555

	5,15	0,15	125645,8967	45261,41965
	5,225	0,225	128181,9909	46354,79149
	5,3	0,3	130547,1125	47459,87101
<b>2</b>	5,84	0,54	147452,8875	55698,55282
	6,38	1,08	165343,465	64417,15785
	6,92	1,62	184218,845	73615,68608
	7,46	2,16	204079,0274	83294,13753
	8	2,7	224924,0122	93452,51219
<b>2 a 3</b>	8,075	0,075	227830,5471	94899,07511
	8,15	0,15	230623,1003	96350,33714
	8,225	0,225	233301,6717	97806,29828
	8,3	0,3	235866,2614	99266,95852
<b>3</b>	8,64	0,34	247492,4012	106050,0039
	8,98	0,68	259635,2584	113134,518
	9,32	1,02	272294,8328	120520,5008
	9,66	1,36	285471,1246	128207,9522
	10	1,7	299164,1337	136196,8724
<b>3 a 4</b>	10,075	0,075	302198,8982	137995,9089
	10,15	0,15	305148,1763	139801,9945
	10,225	0,225	308011,9681	141615,1291
	10,3	0,3	310790,2736	143435,3128
<b>4</b>	11,04	0,74	338231,003	161729,1325
	11,78	1,48	366121,5805	180622,7495
	12,52	2,22	394799,3921	200116,1639
	13,26	2,96	424151,9757	220209,3756
	14	3,7	454179,3313	240902,3848
<b>4 a 5</b>	14,075	0,075	457328,0775	243028,5212
	14,15	0,15	460391,3374	245151,6113
	14,225	0,225	463369,1109	247271,6552
	14,3	0,3	466261,3982	249388,6528
<b>5</b>	15,04	0,74	494714,2857	270511,8061
	15,78	1,48	523841,9453	292135,9038
	16,52	2,22	553644,3769	314260,9458
	17,26	2,96	584121,5805	336886,9322
	18	3,7	615273,5562	360013,8629
<b>5 a 6</b>	18,075	0,075	618422,3024	362381,8896
	18,15	0,15	621485,5623	364747,307
	18,225	0,225	624463,3359	367110,1151
	18,3	0,3	627355,6231	369470,3139
<b>6</b>	18,8875	0,5875	649788,6588	388040,7077
	19,475	1,175	672444,9088	406795,8815
	20,0625	1,7625	695324,3731	425735,8354
	20,65	2,35	718427,0517	444860,5693
	21,2375	2,9375	741752,9445	464170,0833

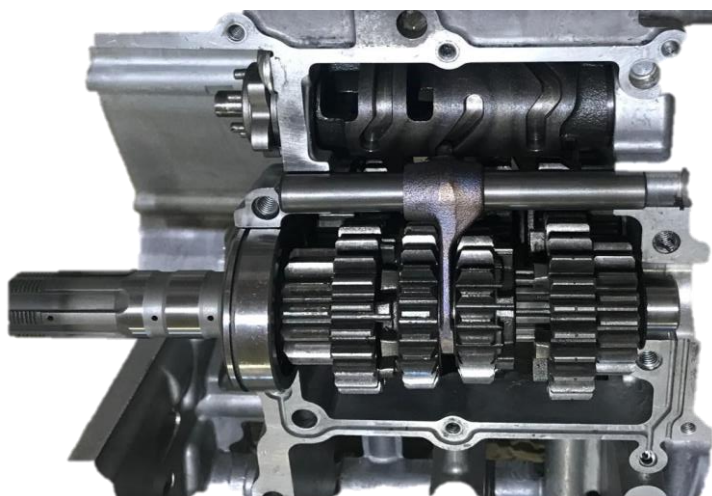
	21,825	3,525	765302,0517	483664,3773
	22,4125	4,1125	789074,3731	503343,4513
	23	4,7	813069,9088	523207,3054

**Tabla 16.** Aceleración angular para el eje primario y secundario

Gear	degree/s (Entrada)	degree/s (Salida)	Aceleración (Entrada)	Aceleración (Salida)
<b>Relentí</b>	6079,027356	2182,774634	-	-
<b>1</b>	39513,67781	14188,03512	6686,930091	2401,052097
<b>1 a 2</b>	30395,13678	14812,44482	-30395,13678	2081,365676
<b>2</b>	39513,67781	19256,17827	3377,23742	1645,827203
<b>2 a 3</b>	33434,65046	19506,79723	-20263,42452	835,3965381
<b>3</b>	41033,43465	23940,16024	4469,873056	2607,860593
<b>3 a 4</b>	36474,16413	24316,10942	-15197,56839	1253,163943
<b>4</b>	42553,19149	28368,79433	1642,980366	1095,320244
<b>4 a 5</b>	37993,92097	28206,32589	-15197,56839	-541,5614571
<b>5</b>	42553,19149	31591,085	1232,235275	914,7997586
<b>5 a 6</b>	37993,92097	31451,92133	-15197,56839	-463,8788695
<b>6</b>	41033,43465	33968,07504	646,7050378	535,3518525

## A4. Inputs para el diseño del sistema de transmisión

En el presente trabajo, el modelado del sistema de transmisión ha sido a partir del cambio de cambio de marchas físico la motocicleta Suzuki GSXR 600 k7. Las medidas para el modelado de las piezas fueron tomadas con la ayuda de un pie de rey. A continuación, se muestran fotografías del cambio de marchas físico.



**Figura 112.** Eje primario, tambor y horquilla (Fuente: propia)



**Figura 113.** Eje secundario y horquillas (Fuente: propia)



**Figura 114.** Horquilla (Fuente: propia)

Se han extraído del sistema físico los siguientes inputs:

**Tabla 17.** Inputs para diseño

	Distancia entre ejes ( $L_e$ )	$z$
Engranaje 1ª	70	14
Engranaje 2ª		19
Engranaje 3ª		21
Engranaje 4ª		24
Engranaje 5ª		23
Engranaje 6ª		24
Engranaje 1ª		39
Engranaje 2ª		39
Engranaje 3ª		36



Engranaje 4ª		36
Engranaje 5ª		31
Engranaje 6ª		29

Los otros inputs fueron calculados con las siguientes ecuaciones.

$$i = \frac{z_1}{z_2} \quad (\text{Ec A.1})$$

$$Dp = \frac{2 \cdot L_e}{1 + i} \quad (\text{Ec A.2})$$

$$m = \frac{z}{Dp} \quad (\text{Ec A.3})$$

$$a = i \quad (\text{Ec A.4})$$

$$d = 1,25 \cdot i \quad (\text{Ec A.5})$$

$$h = a + d \quad (\text{Ec A.6})$$

$$D_i = D_p - (d \cdot 2) \quad (\text{Ec A.7})$$

$$D_e = D_p + (a \cdot 2) \quad (\text{Ec A.8})$$

$$D_e = (0,25 \cdot m \cdot 2) + D_i \quad (\text{Ec A.9})$$

$$P_c = \frac{\pi \cdot Dp}{z} \quad (\text{Ec A.10})$$

Aplicando estas ecuaciones se podrán obtener los inputs que aparecen en el apartado 2.2.1.1. Variables para el modelaje de los dientes.

## A5. Resultados simulación SolidWorks Motion

Tabla 17. Inputs para diseño

HIP 1		HIP 2 (200,40)		HIP 3 (300,60)	
0,000	2,1828E+03	0,000	1,0458E-10	0,000	0,0000E+00



0,007	2,1988E+03	0,005	1,5695E-05	0,003	6,3215E-01
0,013	2,2148E+03	0,010	6,0291E+02	0,005	1,2714E-01
0,020	2,2308E+03	0,010	2,1589E+03	0,010	1,0224E-01
0,027	2,2468E+03	0,011	2,1589E+03	0,010	4,5078E-01
0,033	2,2628E+03	0,015	2,1589E+03	0,013	2,3451E+03
0,040	2,2788E+03	0,020	2,1589E+03	0,016	2,1371E+03
0,047	2,2948E+03	0,025	2,1589E+03	0,018	2,3068E+03
0,053	2,3108E+03	0,030	2,1589E+03	0,020	2,1237E+03
0,060	2,3268E+03	0,035	1,2001E+04	0,021	2,0538E+03
0,067	2,3428E+03	0,035	6,7806E+03	0,023	2,2290E+03
0,073	2,3588E+03	0,040	2,1582E+03	0,026	2,3641E+03
0,080	2,3749E+03	0,045	2,1582E+03	0,028	2,1272E+03
0,087	2,3909E+03	0,050	2,1581E+03	0,030	2,3672E+03
0,093	2,4069E+03	0,055	2,1581E+03	0,031	2,2694E+03
0,100	2,4229E+03	0,060	2,1581E+03	0,034	2,3889E+03
0,107	2,4389E+03	0,065	2,1581E+03	0,036	2,1763E+03
0,113	2,4549E+03	0,070	2,1581E+03	0,039	2,3152E+03
0,120	2,4709E+03	0,075	2,1581E+03	0,040	2,2075E+03
0,127	2,4869E+03	0,080	2,1581E+03	0,041	2,4017E+03
0,133	2,5029E+03	0,085	2,1581E+03	0,044	2,2215E+03
0,140	2,5189E+03	0,090	2,1581E+03	0,047	2,3793E+03
0,147	2,5349E+03	0,095	2,1581E+03	0,049	2,1265E+03
0,153	2,5509E+03	0,100	2,1581E+03	0,050	2,4248E+03
0,160	2,5669E+03	0,105	2,1581E+03	0,052	2,2816E+03
0,167	2,5829E+03	0,108	2,2135E+03	0,054	2,4259E+03
0,173	2,5990E+03	0,110	2,2782E+03	0,057	2,1486E+03
0,180	2,6150E+03	0,110	2,2786E+03	0,060	2,2851E+03
0,187	2,6310E+03	0,115	2,2791E+03	0,060	2,2722E+03
0,193	2,6470E+03	0,120	2,2947E+03	0,062	2,4410E+03
0,200	2,6630E+03	0,125	2,3048E+03	0,065	2,1607E+03
0,207	2,6790E+03	0,130	2,3161E+03	0,068	2,3043E+03
0,213	2,6950E+03	0,135	2,3272E+03	0,070	2,4670E+03
0,220	2,7110E+03	0,140	2,3384E+03	0,070	2,4567E+03
0,227	2,7270E+03	0,145	2,3495E+03	0,073	2,1882E+03
0,233	2,7430E+03	0,150	2,3607E+03	0,075	2,3417E+03
0,240	2,7590E+03	0,155	2,3718E+03	0,078	2,4844E+03
0,247	2,7750E+03	0,160	2,3830E+03	0,080	2,2845E+03
0,253	2,7910E+03	0,165	2,3941E+03	0,081	2,2146E+03
0,260	2,8070E+03	0,170	2,4053E+03	0,083	2,3626E+03
0,267	2,8231E+03	0,175	2,4164E+03	0,086	2,5072E+03
0,273	2,8391E+03	0,180	2,4275E+03	0,088	2,2360E+03
0,280	2,8551E+03	0,185	2,4387E+03	0,090	2,4797E+03
0,287	2,8711E+03	0,190	2,4498E+03	0,091	2,3666E+03
0,293	2,8871E+03	0,195	2,4610E+03	0,094	2,5028E+03

0,300	2,9031E+03	0,200	2,4721E+03	0,096	2,2421E+03
0,307	2,9191E+03	0,205	2,4833E+03	0,099	2,3791E+03
0,313	2,9351E+03	0,210	2,4944E+03	0,100	2,2608E+03
0,320	2,9511E+03	0,215	2,5056E+03	0,102	2,5045E+03
0,327	2,9671E+03	0,220	2,5167E+03	0,104	2,4030E+03
0,333	2,9831E+03	0,225	2,5278E+03	0,107	2,3737E+03
0,340	2,9991E+03	0,230	2,5390E+03	0,109	2,5091E+03
0,347	3,0151E+03	0,235	2,5501E+03	0,110	2,4291E+03
0,353	3,0311E+03	0,240	2,5613E+03	0,112	2,5566E+03
0,360	3,0471E+03	0,245	2,5724E+03	0,114	2,3731E+03
0,367	3,0632E+03	0,250	2,5836E+03	0,117	2,5036E+03
0,373	3,0792E+03	0,255	2,5947E+03	0,120	2,6019E+03
0,380	3,0952E+03	0,260	2,6058E+03	0,120	2,5869E+03
0,387	3,1112E+03	0,265	2,6170E+03	0,122	2,3392E+03
0,393	3,1272E+03	0,270	2,6281E+03	0,125	2,4994E+03
0,400	3,1432E+03	0,275	2,6393E+03	0,127	2,6138E+03
0,407	3,1592E+03	0,280	2,6504E+03	0,130	2,3579E+03
0,413	3,1752E+03	0,285	2,6616E+03	0,130	2,3380E+03
0,420	3,1912E+03	0,290	2,6727E+03	0,132	2,4789E+03
0,427	3,2072E+03	0,295	2,6839E+03	0,135	2,5771E+03
0,433	3,2232E+03	0,300	2,6950E+03	0,138	2,5820E+03
0,440	3,2392E+03	0,305	2,7062E+03	0,140	2,4770E+03
0,447	3,2552E+03	0,310	2,7173E+03	0,140	2,4325E+03
0,453	3,2712E+03	0,315	2,7285E+03	0,143	2,5276E+03
0,460	3,2873E+03	0,320	2,7396E+03	0,146	2,6464E+03
0,467	3,3033E+03	0,325	2,7507E+03	0,149	2,3727E+03
0,473	3,3193E+03	0,330	2,7619E+03	0,150	2,6080E+03
0,480	3,3353E+03	0,335	2,7730E+03	0,151	2,4964E+03
0,487	3,3513E+03	0,340	2,7842E+03	0,154	2,5690E+03
0,493	3,3673E+03	0,345	2,7953E+03	0,157	2,6873E+03
0,500	3,3833E+03	0,350	2,8065E+03	0,159	2,4141E+03
0,507	3,3993E+03	0,355	2,8176E+03	0,160	2,6990E+03
0,513	3,4153E+03	0,360	2,8287E+03	0,162	2,5338E+03
0,520	3,4313E+03	0,365	2,8399E+03	0,164	2,6260E+03
0,527	3,4473E+03	0,370	2,8510E+03	0,167	2,7248E+03
0,533	3,4633E+03	0,375	2,8622E+03	0,170	2,4811E+03
0,540	3,4793E+03	0,380	2,8733E+03	0,170	2,4340E+03
0,547	3,4953E+03	0,385	2,8845E+03	0,172	2,6009E+03
0,553	3,5114E+03	0,390	2,8956E+03	0,175	2,7159E+03
0,560	3,5274E+03	0,395	2,9068E+03	0,177	2,4404E+03
0,567	3,5434E+03	0,400	2,9179E+03	0,180	2,5428E+03
0,573	3,5594E+03	0,405	2,9290E+03	0,180	2,5331E+03
0,580	3,5754E+03	0,410	2,9402E+03	0,183	2,6504E+03
0,587	3,5914E+03	0,415	2,9513E+03	0,185	2,7581E+03

0,593	3,6074E+03	0,420	2,9625E+03	0,188	2,4648E+03
0,600	3,6234E+03	0,425	2,9736E+03	0,190	2,6235E+03
0,607	3,6394E+03	0,430	2,9848E+03	0,191	2,5601E+03
0,613	3,6554E+03	0,435	2,9959E+03	0,193	2,6664E+03
0,620	3,6714E+03	0,440	3,0071E+03	0,196	2,7667E+03
0,627	3,6874E+03	0,445	3,0182E+03	0,198	2,5718E+03
0,633	3,7034E+03	0,450	3,0294E+03	0,200	2,6968E+03
0,640	3,7194E+03	0,455	3,0405E+03	0,201	2,5836E+03
0,647	3,7355E+03	0,460	3,0516E+03	0,204	2,6626E+03
0,653	3,7515E+03	0,465	3,0628E+03	0,206	2,7900E+03
0,660	3,7675E+03	0,470	3,0739E+03	0,209	2,5922E+03
0,667	3,7835E+03	0,475	3,0851E+03	0,210	2,7687E+03
0,673	3,7995E+03	0,480	3,0962E+03	0,212	2,5853E+03
0,680	3,8155E+03	0,485	3,1074E+03	0,215	2,6312E+03
0,687	3,8315E+03	0,490	3,1185E+03	0,217	2,7289E+03
0,693	3,8475E+03	0,495	3,1297E+03	0,220	2,8128E+03
0,700	3,8635E+03	0,500	3,1408E+03	0,220	2,8128E+03
0,707	3,8795E+03	0,505	3,1519E+03	0,223	2,7723E+03
0,713	3,8955E+03	0,510	3,1631E+03	0,225	2,6308E+03
0,720	3,9115E+03	0,515	3,1742E+03	0,228	2,7330E+03
0,727	3,9275E+03	0,520	3,1854E+03	0,230	2,8567E+03
0,733	3,9435E+03	0,525	3,1965E+03	0,230	2,8400E+03
0,740	3,9595E+03	0,530	3,2077E+03	0,233	2,7827E+03
0,747	3,9756E+03	0,535	3,2188E+03	0,235	2,6495E+03
0,753	3,9916E+03	0,540	3,2300E+03	0,238	2,7444E+03
0,760	4,0076E+03	0,545	3,2411E+03	0,240	2,8942E+03
0,767	4,0236E+03	0,550	3,2522E+03	0,241	2,8271E+03
0,773	4,0396E+03	0,555	3,2634E+03	0,243	2,8980E+03
0,780	4,0556E+03	0,560	3,2745E+03	0,246	2,8346E+03
0,787	4,0716E+03	0,565	3,2857E+03	0,249	2,6707E+03
0,793	4,0876E+03	0,570	3,2968E+03	0,250	2,8991E+03
0,800	4,1036E+03	0,575	3,3080E+03	0,251	2,7590E+03
0,807	4,1196E+03	0,580	3,3191E+03	0,254	2,8609E+03
0,813	4,1356E+03	0,585	3,3302E+03	0,256	2,9359E+03
0,820	4,1516E+03	0,590	3,3414E+03	0,259	2,6376E+03
0,827	4,1676E+03	0,595	3,3526E+03	0,260	2,9357E+03
0,833	4,1836E+03	0,600	3,3637E+03	0,262	2,6875E+03
0,840	4,1997E+03	0,605	3,3748E+03	0,265	2,7603E+03
0,847	4,2157E+03	0,610	3,3860E+03	0,267	2,8473E+03
0,853	4,2317E+03	0,615	3,3971E+03	0,270	2,9347E+03
0,860	4,2477E+03	0,620	3,4083E+03	0,270	2,9347E+03
0,867	4,2637E+03	0,625	3,4194E+03	0,273	2,9581E+03
0,873	4,2797E+03	0,630	3,4306E+03	0,275	2,7116E+03
0,880	4,2957E+03	0,635	3,4417E+03	0,278	2,7837E+03

0,887	4,3117E+03	0,640	3,4529E+03	0,280	2,9361E+03
0,893	4,3277E+03	0,645	3,4640E+03	0,281	2,8587E+03
0,900	4,3437E+03	0,650	3,4751E+03	0,283	2,9479E+03
0,907	4,3597E+03	0,655	3,4863E+03	0,286	2,9913E+03
0,913	4,3757E+03	0,660	3,4974E+03	0,288	2,7456E+03
0,920	4,3917E+03	0,665	3,5086E+03	0,290	2,9162E+03
0,927	4,4077E+03	0,670	3,5197E+03	0,291	2,8126E+03
0,933	4,4238E+03	0,675	3,5309E+03	0,294	2,8071E+03
0,940	4,4398E+03	0,680	3,5420E+03	0,297	2,8910E+03
0,947	4,4558E+03	0,685	3,5531E+03	0,299	2,9401E+03
0,953	4,4718E+03	0,690	3,5643E+03	0,300	2,8722E+03
0,960	4,4878E+03	0,695	3,5754E+03	0,302	3,0339E+03
0,967	4,5038E+03	0,700	3,5866E+03	0,305	2,7824E+03
0,973	4,5198E+03	0,705	3,5977E+03	0,307	2,8103E+03
0,980	4,5358E+03	0,710	3,6089E+03	0,310	2,8758E+03
0,987	4,5518E+03	0,715	3,6200E+03	0,310	2,8624E+03
0,993	4,5678E+03	0,720	3,6312E+03	0,312	2,9479E+03
1,000	4,5838E+03	0,725	3,6423E+03	0,315	2,9764E+03
1,007	4,5998E+03	0,730	3,6534E+03	0,318	3,0089E+03
1,013	4,6158E+03	0,735	3,6646E+03	0,320	2,8114E+03
1,020	4,6318E+03	0,740	3,6758E+03	0,321	3,0924E+03
1,027	4,6479E+03	0,745	3,6869E+03	0,323	2,8023E+03
1,033	4,6639E+03	0,750	3,6980E+03	0,326	2,8547E+03
1,040	4,6799E+03	0,755	3,7092E+03	0,328	2,9498E+03
1,047	4,6959E+03	0,760	3,7203E+03	0,330	3,0909E+03
1,053	4,7119E+03	0,765	3,7315E+03	0,331	3,0196E+03
1,060	4,7279E+03	0,770	3,7426E+03	0,334	3,0794E+03
1,067	4,7439E+03	0,775	3,7538E+03	0,336	3,1131E+03
1,073	4,7599E+03	0,780	3,7649E+03	0,339	2,8350E+03
1,080	4,7759E+03	0,785	3,7760E+03	0,340	3,0803E+03
1,087	4,7919E+03	0,790	3,7872E+03	0,341	2,9323E+03
1,093	4,8079E+03	0,795	3,7983E+03	0,344	2,9674E+03
1,100	4,8239E+03	0,800	3,8095E+03	0,347	3,0504E+03
1,107	4,8399E+03	0,805	3,8206E+03	0,349	3,1011E+03
1,113	4,8559E+03	0,810	3,8318E+03	0,350	2,9946E+03
1,120	4,8720E+03	0,815	3,8429E+03	0,352	3,1732E+03
1,127	4,8880E+03	0,820	3,8541E+03	0,354	3,0300E+03
1,133	4,9040E+03	0,825	3,8652E+03	0,357	2,9071E+03
1,140	4,9200E+03	0,830	3,8763E+03	0,360	2,9302E+03
1,147	4,9360E+03	0,835	3,8875E+03	0,360	2,9174E+03
1,153	4,9520E+03	0,840	3,8986E+03	0,363	2,9655E+03
1,160	4,9680E+03	0,845	3,9098E+03	0,366	2,8963E+03
1,167	4,9840E+03	0,850	3,9209E+03	0,369	2,9915E+03
1,173	5,0000E+03	0,855	3,9321E+03	0,370	3,1994E+03

1,180	5,0160E+03	0,860	3,9432E+03	0,371	3,0525E+03
1,187	5,0320E+03	0,865	3,9543E+03	0,374	3,1034E+03
1,193	5,0480E+03	0,870	3,9655E+03	0,377	3,1286E+03
1,200	5,0640E+03	0,875	3,9766E+03	0,379	3,1840E+03
1,207	5,0800E+03	0,880	3,9878E+03	0,380	3,0987E+03
1,213	5,0960E+03	0,885	3,9989E+03	0,382	3,2424E+03
1,220	5,1121E+03	0,890	4,0101E+03	0,385	3,1234E+03
1,227	5,1281E+03	0,895	4,0212E+03	0,387	2,9602E+03
1,233	5,1441E+03	0,900	4,0324E+03	0,390	2,9874E+03
1,240	5,1601E+03	0,905	4,0435E+03	0,390	2,9623E+03
1,247	5,1761E+03	0,910	4,0547E+03	0,393	3,0070E+03
1,253	5,1921E+03	0,915	4,0658E+03	0,396	3,0015E+03
1,260	5,2081E+03	0,920	4,0770E+03	0,398	3,0918E+03
1,267	5,2241E+03	0,925	4,0881E+03	0,400	3,2502E+03
1,273	5,2401E+03	0,930	4,0992E+03	0,401	3,1195E+03
1,280	5,2561E+03	0,935	4,1104E+03	0,404	3,1311E+03
1,287	5,2721E+03	0,940	4,1215E+03	0,406	3,1740E+03
1,293	5,2881E+03	0,945	4,1327E+03	0,409	3,2264E+03
1,300	5,3041E+03	0,950	4,1438E+03	0,410	3,1116E+03
1,307	5,3201E+03	0,955	4,1550E+03	0,412	3,2820E+03
1,313	5,3362E+03	0,960	4,1661E+03	0,414	3,2880E+03
1,320	5,3522E+03	0,965	4,1772E+03	0,417	3,2801E+03
1,327	5,3682E+03	0,970	4,1884E+03	0,420	3,2188E+03
1,333	5,3842E+03	0,975	4,1995E+03	0,420	3,2930E+03
1,340	5,4002E+03	0,980	4,2107E+03	0,423	3,2247E+03
1,347	5,4162E+03	0,985	4,2218E+03	0,425	3,0423E+03
1,353	5,4322E+03	0,990	4,2330E+03	0,428	3,0793E+03
1,360	5,4482E+03	0,995	4,2441E+03	0,430	3,1904E+03
1,367	5,4642E+03	1,000	4,2553E+03	0,431	3,1015E+03
1,373	5,4802E+03	1,005	4,2664E+03	0,433	3,1408E+03
1,380	5,4962E+03	1,010	4,2775E+03	0,436	3,1672E+03
1,387	5,5122E+03	1,015	4,2887E+03	0,438	3,2443E+03
1,393	5,5282E+03	1,020	4,2998E+03	0,440	3,3373E+03
1,400	5,5442E+03	1,025	4,3110E+03	0,441	3,2798E+03
1,407	5,5603E+03	1,030	4,3221E+03	0,444	3,2627E+03
1,413	5,5763E+03	1,035	4,3333E+03	0,447	3,3027E+03
1,420	5,5923E+03	1,040	4,3444E+03	0,449	3,3168E+03
1,427	5,6083E+03	1,045	4,3556E+03	0,450	3,2362E+03
1,433	5,6243E+03	1,050	4,3667E+03	0,452	3,3352E+03
1,440	5,6403E+03	1,055	4,3779E+03	0,455	3,3531E+03
1,447	5,6563E+03	1,060	4,3890E+03	0,457	3,3950E+03
1,453	5,6723E+03	1,065	4,4001E+03	0,460	3,4104E+03
1,460	5,6883E+03	1,070	4,4113E+03	0,460	3,4104E+03
1,467	5,7043E+03	1,075	4,4224E+03	0,463	3,3676E+03

1,473	5,7203E+03	1,080	4,4336E+03	0,465	3,2795E+03
1,480	5,7363E+03	1,085	4,4447E+03	0,468	3,1596E+03
1,487	5,7523E+03	1,090	4,4559E+03	0,470	3,2355E+03
1,493	5,7683E+03	1,095	4,4670E+03	0,470	3,2021E+03
1,500	5,7844E+03	1,100	4,4782E+03	0,473	3,2263E+03
1,507	5,8004E+03	1,105	4,4893E+03	0,475	3,2590E+03
1,513	5,8164E+03	1,110	4,5004E+03	0,479	3,2301E+03
1,520	5,8324E+03	1,115	4,5116E+03	0,480	3,4081E+03
1,527	5,8484E+03	1,120	4,5227E+03	0,481	3,2189E+03
1,533	5,8644E+03	1,125	4,5339E+03	0,484	3,2482E+03
1,540	5,8804E+03	1,130	4,5450E+03	0,487	3,3750E+03
1,547	5,8964E+03	1,135	4,5562E+03	0,490	3,2024E+03
1,553	5,9124E+03	1,140	4,5673E+03	0,490	3,1962E+03
1,560	5,9284E+03	1,145	4,5784E+03	0,493	3,2149E+03
1,567	5,9444E+03	1,150	4,5896E+03	0,496	3,3505E+03
1,573	5,9604E+03	1,155	4,6007E+03	0,498	3,2384E+03
1,580	5,9764E+03	1,160	4,6119E+03	0,500	3,3336E+03
1,587	5,9924E+03	1,165	4,6230E+03	0,501	3,4225E+03
1,593	6,0084E+03	1,170	4,6342E+03	0,504	3,2350E+03
1,600	6,0245E+03	1,175	4,6453E+03	0,507	3,4681E+03
1,607	6,0405E+03	1,180	4,6565E+03	0,509	3,3555E+03
1,613	6,0565E+03	1,185	4,6676E+03	0,510	3,4646E+03
1,620	6,0725E+03	1,190	4,6788E+03	0,512	3,4560E+03
1,627	6,0885E+03	1,195	4,6899E+03	0,515	3,2772E+03
1,633	6,1045E+03	1,200	4,7011E+03	0,517	3,3902E+03
1,640	6,1205E+03	1,205	4,7122E+03	0,520	3,2860E+03
1,647	6,1365E+03	1,210	4,7233E+03	0,520	3,2673E+03
1,653	6,1525E+03	1,215	4,7345E+03	0,523	3,3076E+03
1,660	6,1685E+03	1,220	4,7456E+03	0,526	3,4481E+03
1,667	6,1845E+03	1,225	4,7568E+03	0,528	3,3059E+03
1,673	6,2005E+03	1,230	4,7679E+03	0,530	3,4022E+03
1,680	6,2165E+03	1,235	4,7791E+03	0,531	3,3054E+03
1,687	6,2325E+03	1,240	4,7902E+03	0,533	3,3008E+03
1,693	6,2486E+03	1,245	4,8013E+03	0,536	3,4909E+03
1,700	6,2646E+03	1,250	4,8125E+03	0,539	3,3546E+03
1,707	6,2806E+03	1,255	4,8236E+03	0,540	3,5157E+03
1,713	6,2966E+03	1,260	4,8348E+03	0,541	3,3341E+03
1,720	6,3126E+03	1,265	4,8459E+03	0,544	3,3684E+03
1,727	6,3286E+03	1,270	4,8571E+03	0,547	3,3411E+03
1,733	6,3446E+03	1,275	4,8682E+03	0,549	3,3527E+03
1,740	6,3606E+03	1,280	4,8794E+03	0,550	3,6019E+03
1,747	6,3766E+03	1,285	4,8905E+03	0,552	3,3615E+03
1,753	6,3926E+03	1,290	4,9016E+03	0,555	3,3727E+03
1,760	6,4086E+03	1,295	4,9128E+03	0,557	3,4882E+03

1,767	6,4246E+03	1,300	4,9239E+03	0,560	3,3734E+03
1,773	6,4406E+03	1,305	4,9351E+03	0,560	3,6067E+03
1,780	6,4566E+03	1,310	4,9462E+03	0,563	3,5937E+03
1,787	6,4727E+03	1,315	4,9574E+03	0,565	3,3866E+03
1,793	6,4887E+03	1,320	4,9685E+03	0,568	3,5061E+03
1,800	6,5047E+03	1,325	4,9797E+03	0,570	3,4330E+03
1,807	6,5207E+03	1,330	4,9908E+03	0,571	3,6092E+03
1,813	6,5367E+03	1,335	5,0020E+03	0,573	3,6667E+03
1,820	6,5527E+03	1,340	5,0131E+03	0,576	3,6248E+03
1,827	6,5687E+03	1,345	5,0242E+03	0,578	3,6565E+03
1,833	6,5847E+03	1,350	5,0354E+03	0,580	3,4949E+03
1,840	6,6007E+03	1,355	5,0465E+03	0,581	3,7040E+03
1,847	6,6167E+03	1,360	5,0577E+03	0,583	3,6347E+03
1,853	6,6327E+03	1,365	5,0688E+03	0,586	3,7049E+03
1,860	6,6487E+03	1,370	5,0800E+03	0,589	3,6499E+03
1,867	6,6647E+03	1,375	5,0911E+03	0,590	3,5574E+03
1,873	6,6807E+03	1,380	5,1023E+03	0,591	3,7200E+03
1,880	6,6968E+03	1,385	5,1134E+03	0,594	3,6463E+03
1,887	6,7128E+03	1,390	5,1245E+03	0,596	3,6704E+03
1,893	6,7288E+03	1,395	5,1357E+03	0,599	3,6709E+03
1,900	6,7448E+03	1,400	5,1468E+03	0,600	3,6236E+03
1,907	6,7608E+03	1,405	5,1580E+03	0,601	3,6886E+03
1,913	6,7768E+03	1,410	5,1691E+03	0,604	3,6805E+03
1,920	6,7928E+03	1,415	5,1803E+03	0,606	3,7409E+03
1,927	6,8088E+03	1,420	5,1914E+03	0,609	3,7263E+03
1,933	6,8248E+03	1,425	5,2026E+03	0,610	3,6728E+03
1,940	6,8408E+03	1,430	5,2137E+03	0,612	3,7701E+03
1,947	6,8568E+03	1,435	5,2248E+03	0,614	3,7845E+03
1,953	6,8728E+03	1,440	5,2360E+03	0,617	3,7934E+03
1,960	6,8888E+03	1,445	5,2471E+03	0,619	3,7978E+03
1,967	6,9048E+03	1,450	5,2583E+03	0,620	3,7057E+03
1,973	6,9208E+03	1,455	5,2694E+03	0,622	3,8066E+03
1,980	6,9369E+03	1,460	5,2806E+03	0,624	3,7974E+03
1,987	6,9529E+03	1,465	5,2917E+03	0,627	3,8175E+03
1,993	6,9689E+03	1,470	5,3029E+03	0,630	3,8086E+03
2,000	6,9849E+03	1,475	5,3140E+03	0,630	3,7397E+03
2,007	7,0009E+03	1,480	5,3251E+03	0,632	3,8091E+03
2,013	7,0169E+03	1,485	5,3363E+03	0,635	3,8173E+03
2,020	7,0329E+03	1,490	5,3474E+03	0,637	3,8127E+03
2,027	7,0489E+03	1,495	5,3586E+03	0,640	3,7929E+03
2,033	7,0649E+03	1,500	5,3697E+03	0,640	3,7665E+03
2,040	7,0809E+03	1,505	5,3809E+03	0,642	3,7781E+03
2,047	7,0969E+03	1,510	5,3920E+03	0,645	3,7153E+03
2,053	7,1129E+03	1,515	5,4032E+03	0,648	3,7081E+03



2,060	7,1289E+03	1,520	5,4143E+03	0,650	3,7670E+03
2,067	7,1449E+03	1,525	5,4255E+03	0,651	3,6816E+03
2,073	7,1610E+03	1,530	5,4366E+03	0,654	3,6065E+03
2,080	7,1770E+03	1,535	5,4477E+03	0,656	3,6025E+03
2,087	7,1930E+03	1,540	5,4589E+03	0,659	3,7953E+03
2,093	7,2090E+03	1,545	5,4700E+03	0,660	3,7607E+03
2,100	7,2250E+03	1,550	5,4812E+03	0,661	3,9036E+03
2,107	7,2410E+03	1,555	5,4923E+03	0,664	3,9126E+03
2,113	7,2570E+03	1,560	5,5035E+03	0,666	3,9188E+03
2,120	7,2730E+03	1,565	5,5146E+03	0,669	3,8768E+03
2,127	7,2890E+03	1,570	5,5258E+03	0,670	3,7338E+03
2,133	7,3050E+03	1,575	5,5369E+03	0,671	3,9147E+03
2,140	7,3210E+03	1,580	5,5480E+03	0,674	3,8843E+03
2,147	7,3370E+03	1,585	5,5592E+03	0,677	3,8803E+03
2,153	7,3530E+03	1,590	5,5703E+03	0,679	3,8820E+03
2,160	7,3690E+03	1,595	5,5815E+03	0,680	3,7481E+03
2,167	7,3851E+03	1,600	5,5926E+03	0,682	3,8643E+03
2,173	7,4011E+03	1,605	5,6038E+03	0,684	3,8489E+03
2,180	7,4171E+03	1,610	5,6149E+03	0,687	3,8132E+03
2,187	7,4331E+03	1,615	5,6261E+03	0,690	3,7216E+03
2,193	7,4491E+03	1,620	5,6372E+03	0,690	3,7216E+03
2,200	7,4651E+03	1,625	5,6483E+03	0,693	3,7018E+03
2,207	7,4811E+03	1,630	5,6595E+03	0,695	3,8763E+03
2,213	7,4971E+03	1,635	5,6706E+03	0,698	3,9887E+03
2,220	7,5131E+03	1,640	5,6818E+03	0,700	3,9309E+03
2,227	7,5291E+03	1,645	5,6929E+03	0,700	3,9742E+03
2,233	7,5451E+03	1,650	5,7041E+03	0,703	3,8992E+03
2,240	7,5611E+03	1,655	5,7152E+03	0,706	3,8811E+03
2,247	7,5771E+03	1,660	5,7264E+03	0,708	3,8461E+03
2,253	7,5931E+03	1,665	5,7375E+03	0,710	3,9944E+03
2,260	7,6092E+03	1,670	5,7487E+03	0,711	3,8336E+03
2,267	7,6252E+03	1,675	5,7598E+03	0,714	3,7814E+03
2,273	7,6412E+03	1,680	5,7709E+03	0,716	3,7612E+03
2,280	7,6572E+03	1,685	5,7821E+03	0,719	4,0547E+03
2,287	7,6732E+03	1,690	5,7932E+03	0,720	3,9502E+03
2,293	7,6892E+03	1,695	5,8044E+03	0,722	3,9975E+03
2,300	7,7052E+03	1,700	5,8155E+03	0,724	4,0483E+03
2,307	7,7212E+03	1,705	5,8267E+03	0,727	4,0196E+03
2,313	7,7372E+03	1,710	5,8378E+03	0,729	4,0102E+03
2,320	7,7532E+03	1,715	5,8490E+03	0,730	3,8761E+03
2,327	7,7692E+03	1,720	5,8601E+03	0,732	3,9770E+03
2,333	7,7852E+03	1,725	5,8712E+03	0,735	3,9027E+03
2,340	7,8012E+03	1,730	5,8824E+03	0,737	3,8890E+03
2,347	7,8172E+03	1,735	5,8935E+03	0,740	3,8109E+03

2,353	7,8333E+03	1,740	5,9047E+03	0,740	4,0690E+03
2,360	7,8493E+03	1,745	5,9158E+03	0,743	3,9811E+03
2,367	7,8653E+03	1,750	5,9270E+03	0,745	4,1160E+03
2,373	7,8813E+03	1,755	5,9381E+03	0,748	4,0222E+03
2,380	7,8973E+03	1,760	5,9492E+03	0,750	4,0823E+03
2,387	7,9133E+03	1,765	5,9604E+03	0,750	4,0251E+03
2,393	7,9293E+03	1,770	5,9715E+03	0,753	3,9700E+03
2,400	7,9453E+03	1,775	5,9827E+03	0,755	3,9742E+03
2,407	7,9613E+03	1,780	5,9938E+03	0,758	3,8534E+03
2,413	7,9773E+03	1,785	6,0050E+03	0,760	4,0004E+03
2,420	7,9933E+03	1,790	6,0153E+03	0,761	3,8786E+03
2,427	8,0093E+03	1,795	6,0260E+03	0,763	4,1815E+03
2,433	8,0253E+03	1,800	6,0390E+03	0,766	4,1248E+03
2,440	8,0413E+03	1,805	6,0496E+03	0,768	4,1264E+03
2,447	8,0573E+03	1,810	6,0621E+03	0,770	3,8693E+03
2,453	8,0734E+03	1,815	6,0739E+03	0,771	4,1133E+03
2,460	8,0894E+03	1,820	6,0814E+03	0,773	4,0597E+03
2,467	8,1054E+03	1,825	6,0935E+03	0,776	4,0694E+03
2,473	8,1214E+03	1,830	6,1031E+03	0,778	3,9791E+03
2,480	8,1374E+03	1,835	6,1149E+03	0,780	4,1400E+03
2,487	8,1534E+03	1,840	6,1275E+03	0,781	3,9958E+03
2,493	8,1694E+03	1,845	6,1392E+03	0,783	3,9117E+03
2,500	8,1854E+03	1,850	6,1521E+03	0,786	4,0875E+03
2,507	8,2014E+03	1,855	6,1589E+03	0,789	4,2040E+03
2,513	8,2174E+03	1,860	6,1722E+03	0,790	4,0039E+03
2,520	8,2334E+03	1,865	6,1852E+03	0,791	4,1713E+03
2,527	8,2494E+03	1,870	6,1929E+03	0,794	4,1108E+03
2,533	8,2654E+03	1,875	6,2047E+03	0,796	4,1143E+03
2,540	8,2814E+03	1,880	6,2147E+03	0,799	4,0498E+03
2,547	8,2975E+03	1,885	6,2282E+03	0,800	4,2326E+03
2,553	8,3135E+03	1,890	6,2388E+03	0,801	4,0347E+03
2,560	8,3295E+03	1,895	6,2496E+03	0,804	4,1669E+03
2,567	8,3455E+03	1,900	6,2614E+03	0,807	4,2393E+03
2,573	8,3615E+03	1,905	6,2737E+03	0,809	4,2223E+03
2,580	8,3775E+03	1,910	6,2834E+03	0,810	4,1014E+03
2,587	8,3935E+03	1,915	6,2968E+03	0,812	4,1733E+03
2,593	8,4095E+03	1,920	6,3042E+03	0,814	4,1351E+03
2,600	8,4255E+03	1,925	6,3150E+03	0,817	4,0010E+03
2,607	8,4415E+03	1,930	6,3288E+03	0,820	4,1823E+03
2,613	8,4575E+03	1,935	6,3385E+03	0,820	4,2530E+03
2,620	8,4735E+03	1,940	6,3523E+03	0,822	4,2587E+03
2,627	8,4895E+03	1,945	6,3605E+03	0,825	4,2353E+03
2,633	8,5055E+03	1,950	6,3741E+03	0,828	4,1485E+03
2,640	8,5216E+03	1,955	6,3841E+03	0,830	4,1584E+03

2,647	8,5376E+03	1,960	6,3976E+03	0,830	4,1141E+03
2,653	8,5536E+03	1,965	6,4069E+03	0,833	4,1707E+03
2,660	8,5696E+03	1,970	6,4202E+03	0,836	4,3044E+03
2,667	8,5856E+03	1,975	6,4291E+03	0,838	4,2950E+03
2,673	8,6016E+03	1,980	6,4422E+03	0,840	4,3123E+03
2,680	8,6176E+03	1,985	6,4521E+03	0,841	4,2170E+03
2,687	8,6336E+03	1,990	6,4611E+03	0,843	4,1636E+03
2,693	8,6496E+03	1,995	6,4713E+03	0,846	4,1538E+03
2,700	8,6656E+03	2,000	6,4837E+03	0,848	4,1997E+03
2,707	8,6816E+03	2,005	6,4961E+03	0,850	4,1535E+03
2,713	8,6976E+03	2,010	6,5068E+03	0,851	4,3411E+03
2,720	8,7136E+03	2,015	6,5187E+03	0,854	4,3014E+03
2,727	8,7296E+03	2,020	6,5282E+03	0,856	4,2322E+03
2,733	8,7457E+03	2,025	6,5381E+03	0,859	4,2097E+03
2,740	8,7617E+03	2,030	6,5501E+03	0,860	4,3221E+03
2,747	8,7777E+03	2,035	6,5640E+03	0,861	4,1425E+03
2,753	8,7937E+03	2,040	6,5725E+03	0,864	4,3321E+03
2,760	8,8097E+03	2,045	6,5836E+03	0,866	4,3714E+03
2,767	8,8257E+03	2,050	6,5946E+03	0,869	4,3419E+03
2,773	8,8417E+03	2,055	6,6085E+03	0,870	4,1067E+03
2,780	8,8577E+03	2,060	6,6202E+03	0,871	4,2795E+03
2,787	8,8737E+03	2,065	6,6274E+03	0,874	4,2126E+03
2,793	8,8897E+03	2,070	6,6381E+03	0,876	4,2273E+03
2,800	8,9057E+03	2,075	6,6499E+03	0,879	4,4754E+03
2,807	8,9217E+03	2,080	6,6631E+03	0,880	4,3148E+03
2,813	8,9377E+03	2,085	6,6727E+03	0,881	4,3512E+03
2,820	8,9537E+03	2,090	6,6827E+03	0,884	4,3107E+03
2,827	8,9697E+03	2,095	6,6964E+03	0,887	4,2788E+03
2,833	8,9858E+03	2,100	6,7075E+03	0,889	4,1739E+03
2,840	9,0018E+03	2,105	6,7170E+03	0,890	4,4483E+03
2,847	9,0178E+03	2,110	6,7313E+03	0,892	4,1692E+03
2,853	9,0338E+03	2,115	6,7383E+03	0,894	4,4578E+03
2,860	9,0498E+03	2,120	6,7512E+03	0,897	4,3700E+03
2,867	9,0658E+03	2,125	6,7618E+03	0,899	4,3222E+03
2,873	9,0818E+03	2,130	6,7763E+03	0,900	4,2078E+03
2,880	9,0978E+03	2,135	6,7830E+03	0,902	4,2618E+03
2,887	9,1138E+03	2,140	6,7970E+03	0,904	4,2102E+03
2,893	9,1298E+03	2,145	6,8092E+03	0,907	4,4847E+03
2,900	9,1458E+03	2,150	6,8165E+03	0,909	4,4504E+03
2,907	9,1618E+03	2,155	6,8304E+03	0,910	4,3414E+03
2,913	9,1778E+03	2,160	6,8433E+03	0,912	4,3075E+03
2,920	9,1938E+03	2,165	6,8497E+03	0,915	4,2620E+03
2,927	9,2099E+03	2,170	6,8630E+03	0,917	4,4989E+03
2,933	9,2259E+03	2,175	6,8741E+03	0,920	4,4494E+03

2,940	9,2419E+03	2,180	6,8851E+03	0,920	4,4353E+03
2,947	9,2579E+03	2,185	6,8979E+03	0,922	4,3902E+03
2,953	9,2739E+03	2,190	6,9074E+03	0,925	4,3222E+03
2,960	9,2899E+03	2,195	6,9212E+03	0,928	4,2597E+03
2,967	9,3059E+03	2,200	6,9276E+03	0,930	4,5376E+03
2,973	9,3219E+03	2,205	6,9416E+03	0,930	4,5370E+03
2,980	9,3379E+03	2,210	6,9542E+03	0,933	4,4323E+03
2,987	9,3539E+03	2,215	6,9619E+03	0,935	4,3690E+03
2,993	9,3699E+03	2,220	6,9747E+03	0,938	4,2686E+03
3,000	9,3859E+03	2,225	6,9882E+03	0,940	4,2885E+03